

СИНТЕЗ, ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИЙ НА ОСНОВЕ АММОНИЙНЫХ МЕТАЛЛОФОСФАТОВ

It is shown, that the change of phase structure, chemical composition of metallophosphatic fire retardants and products of their heat treatment at 200–500 °C leads to the increase of their heat-insulating abilities due to the formation of intumescent coverings and isolating melts. The compositions show optimum fireproof properties if they form on the surface of wood intumescent structures and thin melts, which do not block the liberation of volatile nitrogenated inhibitors of burning in a gas phase. The quantitative yield of volatile inhibitors of burning to a flaming zone is determined by features of processes of transformation of fire-retardant systems in a pre-ignition zone of the condensed phase.

Введение. Водная дисперсия аммонийных металлофосфатов в растворе фосфата аммония с общим массовым соотношением основных компонентов $Al_2O_3 : ZnO : P_2O_5 : SiO_2 : NH_3 = 1,0 : 2,4 : 17,3 : 1,0 : 3,9$ (огнезащитный состав «Метафосил» [1]) нашла практическое применение в качестве огнезащитного состава для лесных горючих материалов и древесины. Ранее показано [2, 3], что высокая огнезащитная эффективность состава обусловлена его воздействием как на процессы термолитиза древесных материалов в конденсированной фазе, так и на протекание цепных реакций в газовой фазе, при этом предположено, что наиболее ощутимый вклад в потухание целлюлозных материалов вносят процессы, протекающие с участием летучих азотсодержащих ингибиторов горения в пламенной зоне. Вместе с тем следует отметить, что до настоящего времени в литературе наиболее распространенной точкой зрения относительно ингибирующего действия замедлителей горения является сдвиг в их присутствии термолитиза древесины в сторону образования карбонизованных продуктов и воды [4].

С целью нахождения доминирующих процессов, вносящих определяющий вклад в ингибирование горения древесных материалов, проведено последовательное целенаправленное модифицирование «Метафосила» таким образом, чтобы, с одной стороны, преимущественно воздействовать на процессы, протекающие при горении древесины в конденсированной фазе, а с другой стороны, в газовой фазе. Поставленная задача решалась проведением сопоставительных исследований физико-химических и термических свойств модифицированных составов с их огнезащитной эффективностью. Одновременно исследовали термические превращения огнезащитных исследуемыми составами древесных опилок.

Синтез огнезащитных составов (ОС) осуществляли золь-гель методом в две стадии [1] с введением модификаторов на первой или второй стадии синтеза.

Огнезащитную эффективность продуктов синтеза определяли по ГОСТ 16363–98 и выра-

жали в процентах потери массы при огневом воздействии на огнезащищенные образцы.

Теплоизолирующую способность базового и модифицированных составов определяли по изменению во времени скорости охлаждения нагретой до 350 °C металлической пластины с образовавшимся на ее поверхности слоем вспученного огнезащитного покрытия. Вспучивающий эффект этих же составов сравнивали по высоте образовавшегося вспененного слоя при их нагревании до температур 300–350 °C в течение фиксированного времени (40 мин). За результат принимали среднее значение высоты вспененного слоя, образующегося в результате нагрева (не менее пяти образцов). Выбор температурного интервала, в котором исследовали изолирующие свойства базового и модифицированных составов, обусловлен началом интенсивной деструкции и газификации древесины во время термолитиза.

Рентгенофазовый анализ исходных и модифицированных образцов до и после прогрева проводили на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_{α} излучение).

Термическое поведение синтезированных составов и огнезащитных ими опилок исследовали на дериватографе системы Paulic-Paulic-Erdey в условиях возрастания температуры со скоростью 5 град/мин от 20 до 600 °C в воздушной атмосфере. Поступление азот- и фосфорсодержащих соединений в газовую фазу находили по разности содержания азота и фосфора в исходных и прогретых при 200–500 °C огнезащитных опилках. Азот определяли методом Тюрина [5], фосфор – спектрофотометрически [6]. Эффективную энергию активации процесса термического разложения исходной и огнезащитной древесины определяли дифференциальным методом по известным методикам [7, 8, 9], используя аррениусовскую зависимость $k = k_0 \exp(-E_{\text{акт}} / RT)$, где k – константа скорости; k_0 – предэкспоненциальный множитель; $E_{\text{акт}}$ – эффективная энергия активации, кДж/моль; R – газовая постоянная ($R = 8,314$ кДж/(моль·К)); T – температура, К. Мгновенные значения $E_{\text{акт}}^*$ в координатах $\ln k - 1 / RT$ определяли как тангенс угла наклона касательной к экспериментальной термограви-

метрической кривой в точках с шагом не более 1,5 градуса. За эффективную энергию активации принимали среднее арифметическое мгновенных значений в интервале температур, соответствующих протеканию определенной стадии брутто-процесса термического разложения древесины.

Основная часть. Для нахождения стадии, в наибольшей степени изменяющей условия тепло- и массопереноса при горении древесных материалов, и поиска оптимальной рецептуры ОС изменение химического состава «Метафосила» (принятого за базовый состав) проводили таким образом, чтобы модифицированные продукты воздействовали на процессы замедления горения преимущественно либо в конденсированной, либо в газовой фазах. В результате модифицирования базового состава (табл. 1, состав 1) на первой и / или второй стадии синтеза получено три серии огнезащитных составов, различающихся природой и содержанием пленкообразующих и нейтрализующих агентов.

Изменения огнезащитного эффекта в зависимости от усиления изолирующих свойств в конденсированной фазе (к-фазе) достигали в результате регулирования химической формулы состава, вследствие чего в широком температурном интервале пиролиза древесины (200–500 °С) на поверхности огнезащитных образцов наблюдалось образование пористых продуктов термолитиза, обладающих теплоизолирующими свойствами. Составы первой (табл. 1, составы 2–5) и второй (составы 6–9) серий получены введением в реакционную пульпу на первой стадии синтеза взамен ZnO или его части недефицитных, экологически безопасных оксидов щелочноземельных металлов (кальция и/или магния), снижающих вязкость и температуру образования расплавов металлофосфатных систем [10, 11].

С целью преимущественного ингибирования процессов горения в пламенной зоне базовую рецептуру изменяли введением модификаторов, способных при терморазложении обеспечивать выход большего по сравнению с исходным составом количества летучих азотсодержащих соединений в газовую фазу. С этой целью синтезированы составы третьей серии (табл. 1, составы 10–12), в которых на стадии нейтрализации в базовую рецептуру дополнительно вводили азотсодержащие органические соединения (карбамид и гексаметилентетрамин).

Предварительно показана возможность изменения теплоизолирующих свойств продуктов термообработки образцов, полученных по базовой рецептуре, где в качестве одного из нейтрализующих агентов использовался раствор NaOH [12]. Найдено, что максимальными теплоизолирующими свойствами обладает модифицированный состав, полученный с приме-

нием комплексного нейтрализующего агента (жидкое стекло, аммиачная вода и гидроксид натрия, взятые в пересчете на оксиды и аммиак в массовых соотношениях $\text{SiO}_2 : \text{NH}_3 : \text{Na}_2\text{O} = 1 : 0,9 : 6,6$).

Изменение условий теплообмена между газовой и конденсированной фазами возможно не только за счет образования на пиролизующейся поверхности огнезащитного материала вспученных поверхностных слоев, но и за счет расширения температурного диапазона образования изолирующих расплавов. При синтезе составов первой (кальцийсодержащие составы) и второй серий (кальций-, магний-, цинксодержащие составы) использовали рецептуру комплексного нейтрализатора, позволяющего получать ОС с лучшей вспучивающей способностью. Предполагалось, что наряду с хорошей вспучивающей способностью удастся достигнуть расширения температурного диапазона образования расплавов за счет снижения их вязкости. При замене в рецептуре базового состава пленкообразующего агента – оксида цинка на оксиды кальция и/или магния и одновременном использовании комплексного нейтрализующего агента (табл. 1, составы 2 и 6) найдено, что эффект вспучивания максимально усиливается. Как видно из данных табл. 1, несмотря на значительно более высокие теплоизолирующие свойства этих составов по сравнению с базовым, для них наблюдается резкое снижение огнезащитной эффективности, что, по-видимому, может быть обусловлено низким содержанием азота в их составе. В дальнейшем для увеличения огнезащитной эффективности составов находили оптимальную концентрацию азотсодержащей компоненты, для чего внутри первой и второй серий количество гидроксида натрия в нейтрализующей смеси последовательно заменялось на гидроксид аммония. При этом количество жидкого стекла в нейтрализующем агенте оставалось таким же, как в базовой рецептуре, а соотношения азот- и натрийсодержащих компонент, в пересчете на оксид натрия и аммиак, варьировали следующим образом: $\text{NH}_3 : \text{Na}_2\text{O} = 0,9 : 6,6; 2 : 3,3; 3 : 2; 3,9 : 0$.

В результате огневых испытаний составов первой и второй серий установлено, что близкую или более высокую эффективность по сравнению с базовым ОС проявляют составы с содержанием азота (в пересчете на аммиак) не менее трех массовых долей (табл. 1, составы 4, 5, 8 и 9). Однако однозначной связи между количеством азота и эффективностью ОС не выявлено: составы 8 и 9 при различном содержании азота имеют одинаковую эффективность, а состав 4 при более низком содержании азота эффективнее состава 5.

Предположено, что изменение огнезащитной эффективности в ряду составов 4, 5, 8 и 9 связано не только с содержанием в них азота, но и с различной вспучивающей способностью: недостаток азота в составах 4 и 8 по сравнению с базовым ОС компенсируется их способностью к образованию вспененных теплоизолирующих структур. Несомненно, что существует опреде-

ленный баланс между вкладами процессов, протекающих в конденсированной и газовой фазах, в прекращение горения древесины с участием продуктов термолитиза ОС. Испытания огнезащитной эффективности составов третьей серии (табл. 1, составы 10–12) показали, что по сравнению с базовым более высокую эффективность проявляет только состав с карбамидом (состав 12). По результатам огневых испытаний установлено, что из двух модифицированных аминами составов, имеющих одинаковое содержание азота в рецептуре (N : P = 1,58 : 1), второй состав эффективнее первого, что, по-видимому, может быть обусловлено более широким температурным интервалом разложения карбамида по сравнению с ГМТА.

Для исследования причин различного огнезащитного действия составов сужали круг синтезированных систем металлофосфатов, выбирая из них ОС разной эффективности, активные преимущественно в к-фазе за счет усиления теплоизолирующей способности (составы 2 и 6, 4 и 8) или в газовой фазе за счет увеличения выхода летучих азотсодержащих ингибиторов горения (составы 10 и 12). Далее в сопоставительном плане исследовали их термические свойства и фазовый состав продуктов прогрева.

Рентгенографически установлено, что кристаллическая составляющая базового ОС представлена дигидрофосфатом аммония и аммонийным фосфатом цинка (NH_4ZnPO_4). Кристаллическая фаза составов первой и второй серий (кальций-, магнийсодержащих составов) представляет собой дигидрофосфат натрия (составы 2, 6), дигидрофосфат аммония (составы 4, 8). Составы третьей серии кроме NH_4ZnPO_4 и $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ содержат карбамид (состав 12) или двузамещенный фосфат аммония с примесью неидентифицированной фазы (состав 10).

Исследованием изменения физического состояния всех модифицированных составов при нагревании в интервале температур 150–300 °С установлено, что образование расплавов наблюдается при температурах на 50–100 °С более низких, чем у базового состава (300 °С). При этом в продуктах прогрева составов первой и второй серий (составы 2 и 6) с помощью рентгенофазового анализа обнаруживаются наряду с аморфной фазой конденсированные фосфаты (пирофосфаты натрия). После прогрева в интервале 400–500 °С плавы кальций-, магнийсодержащих модифицированных составов (составы 2, 4, 6, 8) наряду с аморфной фазой содержат стеклообразующий двойной метафосфат – $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_6$.

Таблица 1

Химический состав, теплоизолирующие и огнезащитные свойства базового и модифицированных ОС

№ серии	№ ОС	Пленкообразующий агент	Массовые соотношения компонентов составов $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{ZnO} : \text{MgO} : \text{CaO} : \text{P}_2\text{O}_5 :$ $: \text{SiO}_2 : \text{NH}_3 : \text{Na}_2\text{O}$	Нейтрализующий агент	Средняя высота вспученного слоя, мм	Эффективность*, (ГОСТ 16363), $\Delta m, \%$
	1	ZnO	1,0 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 1,0 : 3,9 : 0	ж. стекло, NH_4OH	2,5	15,6
1	2	CaO	1,0 : 0 : 0 : 1,7 : 17,3 : 1,0 : 0,9 : 6,6	ж. стекло,	6,6	44,2
	3		NH_4OH ,	5,0	20,2	
	4		NaOH	6,0	10,0	
	5		ж. стекло, NH_4OH	1,5	13,7	
2	6	ZnO,	1,0 : 0,8 : 0,4 : 0,6 : 17,3 : 1,0 : 0,9 : 6,6	ж. стекло,	7,2	42,5
	7	MgO,	1,0 : 0,8 : 0,4 : 0,6 : 17,3 : 1,0 : 2,0 : 3,3	NH_4OH ,	6,2	18,7
	8	CaO	1,0 : 0,8 : 0,4 : 0,6 : 17,3 : 1,0 : 3,0 : 2,0	NaOH	4,5	15,2
	9		1,0 : 0,8 : 0,4 : 0,6 : 17,3 : 1,0 : 3,9 : 0	ж. стекло, NH_4OH	0,5	15,3
3	10	ZnO	1,0 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 1,0 : 14,0** : 0	ж. стекло, ГМТА	30,0	18,0
	11		1,0 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 1,0 : 7,2** : 0	ж. стекло,	10,0	18,3
	12		1,0 : 2,4 : 0 : 0 : 17,3 : 1,0 : 14,5** : 0	КМ, NH_4OH	20,0	14,3

* Привес ОС на древесине 8–9 %.

** С учетом азота КМ и ГМТА в пересчете на аммиак.

В аналогичных условиях продукты прогрева составов третьей серии (составы 10, 12) рентгеноаморфны. Необходимо отметить, что составы, содержащие амины, в температурном интервале 350–500 °С склонны к высокократному вспучиванию с образованием мелкопористых «шапок» высотой от 2–4 (состав 12) до 5–9 см (состав 10). Так как модифицированные составы различной эффективности обладают примерно одинаковой способностью к образованию стеклообразных расплавов и вспученных теплоизолирующих покрытий в широком интервале температур, усиление только физического фактора не является необходимым и достаточным условием для прекращения горения древесины.

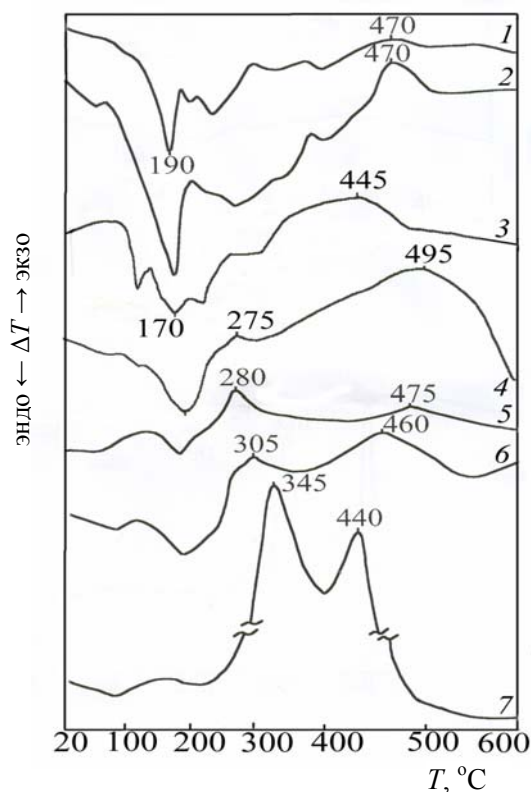


Рисунок. Кривые ДТА:

1 – «Метафосил»; 2 – состав 4; 3 – состав 12;
4, 5, 6 – опилки, обработанные составом 12,
«Метафосилом» и составом 4; 7 – исходные опилки

По данным дериватографического анализа, на кривых ДТА базового и всех модифицированных составов (табл. 2, рисунок, кривые 1–3) в интервале температур 130–270 °С наблюдается глубокий эндотермический эффект, обусловленный термическим разложением дигидрофосфата аммония и аммонийных металлофосфатов, являющихся основой огнезащитных составов. В рассматриваемом температурном интервале одновременно протекают как поликонденсация и плавление (200 °С) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ с образованием пирофосфатного аниона [13], так и процессы термолитиза АМФ, сопровождаю-

щиеся выделением воды и аммиака с одновременным образованием рентгеноаморфных конденсированных фосфатов [14]. При нагревании составов, содержащих амины (рисунок, кривая 3), в том же температурном интервале одновременно с термическими превращениями металлофосфатной матрицы происходит плавление и разложение исходных модификаторов (КМ, ГМТА) и их взаимодействие с другими продуктами термолитиза [15]. При дальнейшем повышении температуры (270–400 °С) происходит более глубокая поликонденсация моноаммонийфосфата с образованием фосфатных анионов со средней длиной цепи, равной 10. В интервале температур 400–530 °С на кривых ДТА всех исследуемых составов наблюдается пологий экзотермический эффект, вызванный частичной кристаллизацией полифосфата аммония и продуктов термолитиза металлофосфатов [13, 14].

На кривых ДТА исходных опилок имеется два экзотермических эффекта: первый с максимумом 345 °С обусловлен, согласно [16], термическим разложением древесины и пламенным горением образующихся летучих продуктов термолитиза, а второй экзотермический эффект с максимумом 440 °С соответствует процессу гетерогенного горения обугленного остатка.

Согласно кривой ТГ потеря массы протекает в три стадии (табл. 2), с максимальной потерей массы (62 %) в интервале температур 240–340 °С.

В присутствии ОС характер термического разложения опилок меняется: резко снижаются интенсивности экзотермических пиков и изменяются температуры их максимумов. Сдвиг первого максимума на кривой ДТА (табл. 2, рисунок) для образцов древесины, обработанных ОС, в сторону более низких температур (на 15–70 °С) с одновременным уменьшением потери массы на второй стадии термической деструкции свидетельствует о преимущественном термолитизе древесины по дегидратационному пути, который реализуется в присутствии ОС и продуктов их разложения с образованием карбонизованного остатка. Сдвиг второго экзотермического пика на кривых ДТА в высокотемпературную область может быть обусловлен как образованием на поверхности огнезащитной древесины экранирующего слоя из карбонизованных продуктов, вспененных структур и расплавов, так и поступлением в газовую фазу летучих ингибиторов горения, в результате чего происходит охлаждение пламени и снижается теплоприход к пиролизующемуся в к-фазе горючему материалу.

При исследовании кинетических закономерностей термолитиза образцов исходной и огнезащитной древесины в интервале температур второй стадии потери массы (табл. 2) определены эффективные энергии активации.

Данные комплексного термического анализа (ТГ, ДТА), эффективная энергия активации процесса термоллиза исходных и огнезащитных опилок на начальной стадии, огнезащитная эффективность ОС

№ ОС	Потеря массы (кривая ТГ), % (интервал температур, °С)				Температуры максимумов эффектов на кривой ДТА, °С			$E_{\text{акт}}$, кДж/моль	Эффективность, Δm , %
	Общая	Первая стадия	Вторая стадия	Третья стадия	Эндо-эффект	Первый экзо-эффект	Второй экзо-эффект		
–	97,2	10,2 (20–240)	62,6 (240–340)	23,9 (340–600)	–	345	440	139,5	65,7
1	52,2	5,7 (50–180)	21,5 (180–280)	25,0 (280–600)	190	280	475	26,8	16,0
2	55,5	6,9 (50–200)	18,5 (200–300)	30,0 (300–600)	180	330	450	81,4	44,2
4	49,7	4,4 (50–175)	16,0 (175–280)	18,7 (280–600)	190	305	460	48,6	10,0
6	56,3	9,4 (50–215)	18,8 (215–290)	28,1 (290–600)	190	315	460	63,7	42,5
8	70,6	16,0 (50–150)	26,6 (150–290)	28,0 (290–600)	200	310	450	31,3	15,2
10	71,5	15,9 (50–180)	31,8 (180–290)	23,8 (290–600)	195	275	495	17,0	18,0
12	72,0	5,6 (50–140)	42,8 (140–280)	23,7 (280–600)	170	275	495	22,6	14,3

Полученные значения эффективных энергий активации свидетельствуют о том, что ОС на основе аммонийных металлофосфатов выступают в роли модификаторов древесины, способствующих протеканию ее термоллиза по пути процесса каталитической дегидратации целлюлозной составляющей с образованием преимущественно негорючих продуктов (H_2O и CO_2) и карбонизованного поверхностного изолирующего слоя. Характерно, что при обработке древесины ОС, в присутствии которых первый пик на кривых ДТА сдвигается дальше в область более низких температур (табл. 2, составы 1, 4, 8, 10, 12), $E_{\text{акт}}$ процесса деструкции исходной древесины снижается в 3–5 раз, что, вероятно, свидетельствует о высокой карбонизирующей активности этих составов в отношении древесины.

Исходя только из дериватографических данных, затруднительно объяснить причину высокой

эффективности одних ОС и низкой эффективности других, так как для составов, имеющих различный огнезащитный эффект (табл. 2, составы 2 и 4, 6 и 8), наблюдаются близкие значения температур второго экзоэффекта. При этом необходимо отметить, что общая потеря массы образцов древесины, обработанной составами различной эффективности, не имеет однозначной связи с данными по потере массы этими же образцами при огневом воздействии. Следовательно, процессы, протекающие по механизму каталитической дегидратации, нельзя считать определяющими при ингибировании горения древесины исследуемыми составами.

Проследим, как изменяется огнезащитная эффективность базового и модифицированных ОС в зависимости от суммарного поступления летучих азот- и фосфорсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу при термообработ-

ке огнезащитных опилок (табл. 3). Данные табл. 3 свидетельствуют, что для исследуемых ОС в целом существует корреляция между количественным поступлением азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу и огнезащитной эффективностью составов.

Обращает на себя внимание то, что в случае наиболее эффективного состава 4, содержащего оксид кальция, поступление летучих соединений азота в газовую фазу выше по сравнению с этим же показателем для состава, содержащего оксиды цинка, кальция и магния (состав 8). Этот факт, по-видимому, можно объяснить разницей в вязкости металлофосфатных систем, содержащих оксиды различных щелочноземельных металлов. Исходя из того что при температуре 500 °С вязкость расплава метафосфата кальция в 5–6 раз ниже по сравнению с вязкостью расплава соответствующей соли магния [17], можно предположить, что на поверхности горения древесины, защищенной ОС, имеющими различную вязкость расплавов, основу которых, согласно [18], составляют метафосфаты металлов, создаются неодинаковые условия для выхода летучих ингибиторов горения в газовую фазу. Это может стать причиной различной эффективности составов, модифицированных кальций- и магниесодержащими компонентами.

Более низкая эффективность ОС, содержащего ГМТА (табл. 3, состав 10), по сравнению с базовым объясняется меньшим суммарным количеством азота, поступившим в газовую фазу в исследуемом интервале температур. Вероятно, высокая плотность и непроницаемость образовавшегося вспененного покрытия, эффективно препятствующего поступлению окислителя к горячей поверхности, одновременно явились препятствием для выхода азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу. Огнезащитная эффективность карбамидосодержащего ОС (состав 12), несмотря на более высокое содержание азота

в рецептуре и суммарное поступление азота в газовую фазу по сравнению с базовым ОС, возросла не так значительно, как можно было бы ожидать. Исходя из результатов химического анализа продуктов прогрева образцов древесины в присутствии состава 12 при температуре 200 °С установлено, что причиной этому может быть преждевременная потеря значительного количества азота (34 %) при терморазложении, в итоге летучие азотсодержащие ингибиторы горения покидают возможную зону реакции до начала стадии интенсивного термолитического разложения древесины (240 °С). В связи с этим предположено, что эффективность модифицированных ОС определяется не только количественным, но и своевременным, совпадающим с началом интенсивного термолитического разложения матрицы выходом азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу.

Закключение. Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно утверждать, что основным механизмом, ответственным за прекращение горения древесины с помощью исследованных ОС является ингибирование процессов в газовой фазе летучими соединениями азота. На примере состава 8, имеющего более низкое общее содержание азота по сравнению с «Метафосилом», достигнуты улучшенные огнезащитные свойства за счет изменения условий тепло- и массопереноса между пламенной зоной и пиролизующейся древесиной (образование карбонизованных продуктов, низковязких расплавов и вспененных теплоизолирующих слоев). Показана реальная возможность увеличения эффективности ОС путем создания условий для реализации нескольких механизмов прекращения горения. Установлено, что температурный интервал максимального выхода азотсодержащих ингибиторов горения в газовую фазу должен совпадать с температурным интервалом начала интенсивного терморазложения целлюлозосодержащего материала.

Таблица 3

Суммарное поступление азота ($\sum N$) и фосфора ($\sum P$) в газовую фазу при термообработке* огнезащитных опилок в температурном интервале 200–500 °С

№ ОС	$\sum N$, г	$\sum P$, г	Огнезащитная эффективность	
			Потеря массы, %	Время горения, с
1 (базовый)	16,27	2,65	15,6	0
2	6,80	1,44	44,2	61
4	16,25	1,95	10,0	0
6	5,81	1,25	42,5	65
8	16,16	1,90	15,2	2
10	15,80	1,65	18,0	0
12	21,57	1,65	14,3	0

*Время термообработки 10 мин.

Примечание. Данные о поступлении азота и фосфора приведены в граммах в пересчете на 100 г опилок с учетом потери массы.

Литература

1. Состав для профилактики, локализации лесных пожаров и/или борьбы с ними: пат. 2149 Респ. Беларусь, МПК А 62 D 1/ 00, С 09 К 21/02 / Л. В. Кобец, В. В. Богданова, Н. М. Кобзева и др.; заявитель НИИ ПФП БГУ, НИИ ФХП БГУ, Гомельский хим. завод. – № 950285; заявл. 08.06.95; опубл. 30.06.98 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1998. – № 10. – С. 55.
2. Богданова, В. В. Огнезащитное действие замедлителей горения в целлюлозных материалах / В. В. Богданова, О. И. Кобец // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2005. – Вып. 63: Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 325–327.
3. Богданова, В. В. Огнегасящий эффект замедлителей горения в синтетических полимерах и природных горючих материалах / В. В. Богданова // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст. / НИИ ФХП БГУ; под ред. О. А. Ивашкевича. – Минск, 2003. – Вып. 2. – С. 344–375.
4. Кодолов, В. И. Критерии подбора замедлителей горения полимерных материалов / В. И. Кодолов, В. И. Повстугар, В. И. Михайлов // Теоретические и практические аспекты огнезащиты древесных материалов: сб. ст. – Рига: Зинатне, 1985. – С. 122–135.
5. Аринушкина, Е. В. Руководство по химическому анализу почв / Е. В. Аринушкина. – М.: Наука, 1970. – 487 с.
6. Марченко, З. Фотометрическое определение элементов / З. Марченко. – М.: Мир, 1971. – 570 с.
7. Шестак, Я. Физико-химические свойства твердых неорганических веществ / Я. Шестак. – М.: Мир, 1987. – 456 с.
8. Павлова, С. А. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений (Методы аналитической химии) / С. А. Павлова, И. В. Журавлева, Ю. И. Толчинский. – М.: Химия, 1983. – 120 с.
9. Plastics. Thermogravimetry (TG) of polymers. Part 2: Determination of activation energy: ISO 11358–2: 2005 (E).
10. Химический состав и свойства фосфат-содержащего декоративного стекла / В. Н. Макаров [и др.] // Журн. прикл. химии. – 1998. – Т. 36, вып. 5. – С. 736–739.
11. Рожнов, В. Б. О характере взаимосвязи некоторых физико-химических свойств расплавов метафосфатов щелочных и щелочноземельных металлов с природой катиона / В. Б. Рожнов, Д. З. Серазетдинов, А. Б. Бектуров // Изв. АН КазССР. Сер. хим. – 1982. – № 5. – С. 1–5.
12. Богданова, В. В. Пути целенаправленного создания эффективных огнезащитных составов для древесины и лесных горючих материалов / В. В. Богданова, О. И. Кобец, Л. В. Радкевич // Свиридовские чтения: сб. ст. – Минск: БГУ, 2005. – Вып. 2. – С. 186–192.
13. Разина, З. П. Исследование процесса поликонденсации монозамещенного ортофосфата аммония / З. П. Разина, Л. И. Кузнецов-Фетисов // Журн. прикл. химии. – 1975. – Т. 48, № 4. – С. 875–877.
14. Лепилина, Р. Г. Термограммы неорганических фосфатных соединений: справочник / Р. Г. Лепилина, Н. М. Смирнова; под ред. И. В. Тананаева. – Л.: Наука, 1984. – 334 с.
15. Химическая энциклопедия: в 5 т. / редкол.: И. Л. Кнунянц (гл. ред.) [и др.]. – М.: Большая Рос. энцикл., 1992. – 5 т.
16. Леонович, А. А. Теория и практика изготовления огнезащищенных ДСП / А. А. Леонович. – Л., 1989. – 175 с.
17. Мазурин, О. В. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: справочник: в 5 т. // О. В. Мазурин, М. В. Стрельцина, Т. П. Швайко-Швайковская; под ред. В. К. Лeko. – Л., 1987. – Т. 5: Однокомпонентные и двухкомпонентные оксидные системы. – 496 с.
18. Констант, З. А. Фосфаты двухвалентных металлов / З. А. Констант, А. П. Диндуне. – Рига, 1987. – 371 с.