

*А.А. Чернуха, адъюнкт, УГЗУ,  
А.А. Киреев, канд. хим. наук, доцент, УГЗУ,  
С.Н. Бондаренко, канд. техн. наук, УГЗУ,  
А.Д. Кириченко, курсант, УГЗУ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КСЕРОГЕЛЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ**

(представлено д-ром хим. наук Д.В.Калугиным)

Проведены экспериментальные исследования огнезащитного действия покрытия на основе ксерогеля гелеобразующей системы ( $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71 SiO_2$ ). Получено регрессионное уравнение, описывающее влияние состава покрытия на его огнезащитную эффективность.

**Ключевые слова:** огнезащита, огнезащитная эффективность, огнезащитное покрытие, ксерогель, экспериментальные исследования, оптимизация.

**Постановка проблемы.** В настоящее время наиболее распространенным строительным материалом традиционно остается древесина и изделия из нее. Однако наряду с достоинствами, выгодно отличающими ее от других строительных материалов, древесина обладает и недостатками, главными из которых являются легкая воспламеняемость и горючесть. В связи с этим, важное значение, приобретает проблема огнезащиты древесины различными способами. Наиболее эффективными являются обработка огнезащитными покрытиями и пропитка специальными составами [1].

Одним из способов огнезащиты является способ нанесения на поверхность защищаемого материала слоя покрытия, эффективность которого определяется физико-химическими свойствами покрытия. При местном воздействии кратковременного источника зажигания огнезащитные покрытия затрудняют горение деревянных конструкций, облегчают тушение пожара, а в ряде случаев исключают возможность его возникновения [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В предыдущих работах [3, 4] подобраны режимы нанесения гелеобразующей системы, обеспечивающие хорошую адгезию покрытия к поверхности древесины и отсутствие растрескивания и отслаивания покрытий при сушке.

В работе [4] были проведены сравнительные испытания огнезащитных покрытий на основе ксерогелей и других сертифицирован-

ных огнезащитных средств разного типа. Исследования показали, что полученные ксерогелевые слои проявляют высокие огнезащитные свойства. Так же было установлено, что ксерогелевые слои полученные на основе силиката натрия и солей двух- и трёхвалентных металлов не склонны к вспучиванию. Небольшое вспучивание возможно только при подаче большого избытка силиката натрия. Для достижения высоких огнезащитных свойств таких покрытий необходимо нанесение толстых слоёв.

В случае применения в качестве катализатора гелеобразования солей одновалентных металлов продуктами взаимодействия является силикагель [4]. Полученное таким образом покрытие способно к значительному вспучиванию. В ряде случаев коэффициент вспучивания достигал 20.

**Постановка задачи и её решение.** Целью работы является установление количественной взаимосвязи между составляющими огнезащитного покрытия для древесины. Для этого были проведены экспериментальные исследования влияния концентраций компонентов покрытия на его огнезащитную эффективность. Образцы древесины для эксперимента подготавливались согласно требованиям ГОСТ 16363-98. Толщина покрытия составляла – 1,5 мм. После сушки, образцы исследовались на термогравиметрической установке [4].

Обработка полученных результатов выполнена с использованием методов теории планирования эксперимента [5]. По результатам предварительных исследований было установлено, что наибольшее влияние на огнезащитную эффективность оказывают четыре фактора [3]: концентрация раствора  $K_2CO_3$ , содержания асбеста и вермикулита в растворе силиката натрия и соотношение расходов наносимых растворов гелеобразователя и катализатора гелеобразования. С учётом химической совместимости компонентов покрытия, условиями быстрого гелеобразования и возможности нанесения были определены уровни варьирования этих факторов (табл. 1).

План-матрица эксперимента типа  $2^4$  была составлена следующим образом: для  $x_1$  уровни чередуются в каждом опыте, для  $x_2$  – через два опыта, для  $x_3$  – через четыре, для  $x_4$  – через восемь. План-матрица представлена в табл. 2. Приведенный план позволяет проводить независимую оценку коэффициентов уравнения регрессии, он представляет собой расширенную матрицу, так в ней имеются столбцы, позволяющие оценить коэффициенты регрессии при взаимодействии факторов.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Нулевой уровень $x_i = 0$	Интервал варьирования	Максимальный уровень $x_i = 1$	Минимальный уровень $x_i = -1$
Содержание асбеста, г/л	$x_1$	45	15	60	30
Содержание вермикулита, г/л	$x_2$	55	15	70	40
Концентрация $K_2CO_3$ , %	$x_3$	36	6	42	30
Соотношение расходов, %	$x_4$	2	1	3	1

Таблица 2 – Условия и результаты опытов по исследованию огнезащитного действия покрытия на основе гелеобразующей системы  $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71 SiO_2$ 

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$	F
-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	195
+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	210
-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	211,5
+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	270
-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	297,5
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	240
-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	270
+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	370
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	205
+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	260
-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	305
+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	250
-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	310
+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	300
-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	310
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	340

Оценка ошибки эксперимента была проведена по результатам 7 параллельных опытов в центре плана (табл. 3). Среднее значение результатов опытов в центре плана составляет 280,71.

**Таблица 3 – Результаты опытов в центре плана по исследованию огнезащитного действия покрытия на основе гелеобразующей системы  $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71 SiO_2$**

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
Результат	280	270	275	290	285	265	300

Проверка гипотезы о значимости квадратичных эффектов в модели проводилась с помощью неравенства

$$|\bar{F}_{ц.п.} - b_0| < t_{(0,05;6)} \cdot s_y \cdot \sqrt{\frac{n_0 + N}{n_0 \cdot N}}, \quad (1)$$

где  $\bar{F}_{ц.п.}$  – среднее значение результатов опытов в центре плана;  $b_0$  – оценка, полученная по результатам эксперимента в ядре плана, равная 271,5;  $s_y$  – оценка дисперсии ошибок опытов, которая определялась по результатам семи параллельных опытов в центре плана;  $t_{(0,05;6)}$  – значение коэффициента Стьюдента при 6 степенях свободы;  $N$  – количество вычислительных процедур для плана  $2^4$ ;  $n_0$  – количество опытов в центре плана.

При  $s_y=12,05$  и  $t_{(0,05;6)}=2,45$  неравенство (1) выполняется, следовательно, квадратичные эффекты не являются статистически значимыми, поэтому математическая модель может быть представлена в виде неполного квадратного уравнения.

Выполнив расчет значений коэффициентов регрессии и оценив их значимость по критерию Стьюдента [5], было получено уравнение регрессии:

$$F = 271,5 + 8,5 \cdot x_1 + 19,3 \cdot x_2 + 33,2 \cdot x_3 + 13,5 \cdot x_4 + 8,2 \cdot x_1 \cdot x_2 - 7,6 \cdot x_1 \cdot x_4 + 16,5 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 16,9 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \quad (2)$$

Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера дала положительный результат.

Анализ выражения (2) показал, что при нулевых значениях всех факторов, показатель огнезащитной эффективности равен 271,5 с. Увеличение значений концентраций первых трех компонентов покрытия ведет к увеличению значения функции отклика. При этом наибольший эффект вносит изменение концентрации  $K_2CO_3$ . Значительное влияние на исследуемый показатель оказывает также

концентрация вермикулита, это подтверждается тем, что оценки при взаимодействии факторов выше там, где присутствует  $x_2$ .

Исследуем выражения (2) на экстремум. Запишем частные производные по всем переменным

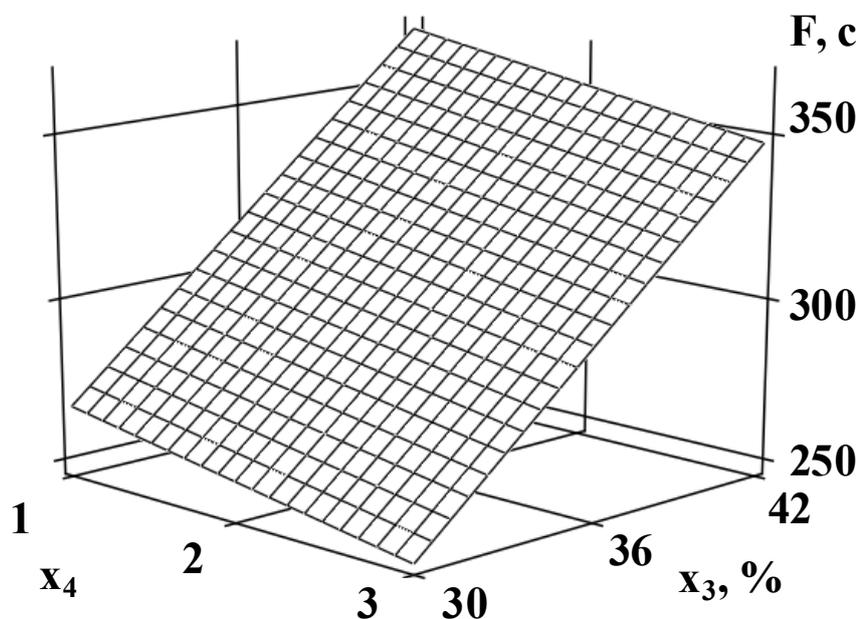
$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 8,5 + 8,2 \cdot x_2 - 7,6 \cdot x_4 + 16,5 \cdot x_2 \cdot x_3 - 16,9 \cdot x_2 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = 19,3 + 8,2 \cdot x_1 + 16,5 \cdot x_1 \cdot x_3 - 16,9 \cdot x_1 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_3} = 33,2 + 16,5 \cdot x_1 \cdot x_2;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_4} = 13,5 - 7,6 \cdot x_1 - 16,9 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Приравняв правые части полученных выражений нулю, получим систему уравнений, решением которой будет точка с координатами (6,25; -0,32; 0,59; 1,25). Так как значения первой и четвертой координаты больше единицы, то стационарная точка находится за пределами области определения модели (2). Для поиска экстремума функция (2) проведем процедуру пошагового перебора по всем четырем координатам. В результате расчетов установлено, что максимальное время до момента потери 9% от исходной массы, обработанного огнезащитным покрытием, образца достигается при максимальных значениях трех первых параметров и минимальном значении четвертого (рис. 1).



**Рис.1. – Зависимость огнезащитной эффективности от концентрации  $K_2CO_3$  и соотношения расходов гелеобразующих компонентов**

**Выводы.** На основании экспериментальных исследований огнезащитного действия покрытия на основе гелеобразующей системы  $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71 SiO_2$  установлена количественная взаимосвязь между её показателем огнезащитной эффективности и концентрациями компонентов. Для повышения огнезащитной способности гелеобразующей системы целесообразно увеличивать концентрацию карбоната калия, а с учетом соблюдения условий гелеобразования из растворов  $K_2CO_3$  и  $Na_2O SiO_2$  соотношение их объемов должно быть 1:1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Собурь С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Справочник / 2-е изд., доп. (с изм.). – М.: Спецтехника, 2003. – 240 с.
2. Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Исследование областей быстрого гелеобразования огнетушащих и огнезащитных систем на основе гидроксидов и карбонатов // Науковий вісник будівництва. – 2006. – вип. 36. – С. 190-194.
3. Киреев А.А., Чернуха А.А., Кириченко А.Д. Термогравиметрические исследования огнезащитного действия ксерогелевых покрытий для древесины // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – Вып. 23. – С. 73-78.
4. Чернуха А.А., Киреев А.А. Подбор гелеобразующих систем для получения вспучивающихся огнезащитных покрытий // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – Вып. 24. – С. 54-60.
5. Винарский В.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.

nuczu.edu.ua

А.А. Чернуха, О.О. Кіреєв, С.М. Бондаренко, А.Д. Кириченко

**Дослідження вогнезахисної ефективності покриттів на основі ксерогелевої композиції.**

Проведено експериментальні дослідження вогнезахисної дії покриття на основі ксерогеля гелеутворюючої системи ( $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71SiO_2$ ). Отримано регресійне рівняння, що описує вплив складу покриття на його вогнезахисну ефективність.

**Ключові слова:** вогнезахист, вогнезахисна ефективність, вогнезахисне покриття, ксерогель, експериментальні дослідження, оптимізація.

A.A. Chernuha, A.A. Kireev, S.N. Bondarenko, A.D. Kirichenko

**Fireproof efficiency of coatings based on the gel compositions research.**

The fireproof action research of coating based on the ( $K_2CO_3 + Na_2O \cdot 2,71SiO_2$ ) gel has been carried out. It is received the regression equation describing the influence of phase composition of a coating on its fireproof efficiency.

**Key terms:** fireproof, fireproof efficiency, a fireproof coating, xerogel, experimental researches, optimization.