

*А.С. Беликов, д.т.н., профессор, зав. каф. БЖД ГВУЗ «ПГАСА»,
В.А. Шаломов, к.т.н., доцент каф. БЖД ГВУЗ «ПГАСА»,
С.Ю. Рагимов, к.т.н., ст. преподаватель, НУГЗУ,
Н.Н. Удянский, к.т.н., доцент, нач. факультета, НУГЗУ*

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Получены зависимости, которые позволяют прогнозировать безопасное время нахождения людей на объекте до обрушения металлических конструкций.

Ключевые слова: математическая зависимость, огнестойкость, огнезащитная композиция, моделирование.

Постановка проблемы. Как показал анализ условий работы строительных конструкций в очаге пожара, время потери их несущей способности зависит от теплофизических свойств материала строительной конструкции и ее конструктивных особенностей. Строительные конструкции (балки, фермы, перекрытия и другие элементы) с учетом степени огнестойкости зданий и сооружений и согласно требований пожарной безопасности должны обеспечивать нормативную степень огнестойкости, что достигается в настоящее время различными путями. Одним из таких эффективных способов повышения огнестойкости рассматриваемых строительных конструкций является применение огнезащитных вспучивающихся покрытий, что позволяет при небольшой толщине нанесения, не утяжеляя конструкцию, не изменяя ее конструктивных особенностей выполнить требования пожарной безопасности.

Однако, их применение для защиты металлических конструкций не всегда оправдано из-за низкой адгезионной прочности к металлу, а также не технологичности при нанесении покрытия толщиной более 1мм.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ существующих в отечественной и зарубежной практике огнезащитных покрытий показывает, что не все из них находят широкое применение, ввиду, недостаточной проработки технологии и оценки эксплуатационных свойств [1-3].

Постановка задачи и ее решение. Поэтому, для устранения указанных недостатков возникла необходимость проведения исследований по разработке огнезащитных композиций для защиты металлических конструкций. На основании исследований проведенных в научно-исследовательской лаборатории кафедры БЖД Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры (ПГАСА) были раз-

работаны ряд огнезащитных вспучивающихся покрытий на основе жидкого стекла. В качестве основных наполнителей в них были использованы: зола унос, горелая порода, асбест и асбестоцементные отходы и т.д. Нами были проведены исследования по отбору исходных компонентов для огнезащитного покрытия. При этом проводилась оценка влияния входящих компонентов на адгезионную прочность покрытия с металлом и повышение огнестойкости. Испытаниям подвергались стандартные модельные образцы 200x200 мм из стали Ст3 и стали 40 ГОСТ 19903-74 с покрытием и без покрытия на экспериментальной лабораторной установке по методике ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

Результаты исследований представлены в табл. 1, рис. 1.

Табл. 1. Влияние входящих компонентов на адгезионную прочность с металлом

Жидкое стекло	Асбест мелко-волокнистый, IV сорта	Асбестоцементные отходы	Оксид цинка	Шамотный песок	Бура	Адгезионная прочность с металлом, образцы выдержаны в течении 28 сут при $t=18-20^{\circ}\text{C}$; W до 65%, МПа	Время достижения критической температуры при $\delta_{пр}=10$ мм, $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7	8
100	-	-	-	-	-	3,1	37
90,0	10,0	-	-	-	-	3,8	45
80,0	20,0	-	-	-	-	4,0	52
90,0	-	10,0	-	-	-	3,2	40
85,0	-	15,0	-	-	-	3,5	45
80,0	-	20,0	-	-	-	3,8	50
75,0	-	25,0	-	-	-	6,4	54
70,0	-	30,0	-	-	-	6,8	55
65,0	-	35,0	-	-	-	6,0	50
60,0	-	40,0	-	-	-	5,4	46
55,0	-	45,0	-	-	-	5,1	42
50,0	-	50,0	-	-	-	4,0	40
90,0	-	7,0	3,0	-	-	3,4	40
85,0	-	10,0	5,0	-	-	4,8	44
80,0	-	13,0	7,0	-	-	5,1	52
77,0	-	14,0	9,0	-	-	5,2	60
75,0	-	16,5	8,5	-	-	5,8	62
72,0	-	20,0	8,0	-	-	7,2	75
68,5	-	25,0	6,5	-	-	7,3	75
60,0	-	35,0	5,0	-	-	7,6	70
55,0	-	44,0	4,0	-	-	6,9	58
50,0	-	47,0	3,0	-	-	6,1	56
1	2	3	4	5	6	7	8
86,0	-	10,0	-	4,0	-	3,2	40
81,0	-	15,0	-	4,0	-	3,4	42
76,0	-	20,0	-	4,0	-	3,8	49
71,0	-	25,0	-	4,0	-	4,1	57
75,0	-	20,0	-	5,0	-	5,1	55
70,0	-	25,0	-	5,0	-	5,9	61

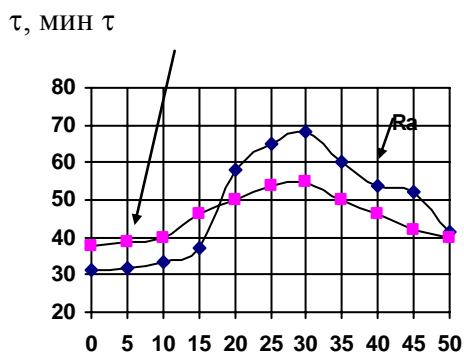
Табл. 1. (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
65,0	-	30,0	-	5,0	-	5,5	60
85,0	-	5,0	-	10,0	-	3,1	42
80,0	-	5,0	-	15,0	-	2,8	44
86,0	-	7,0	3,0	4,0	-	3,0	40
85,0	-	7,0	3,0	5,0	-	4,3	46
80,0	-	10,0	5,0	5,0	-	5,2	53
79,0	-	10,0	5,0	6,0	-	5,4	58
73,0	-	15,0	7,0	5,0	-	6,4	70
68,0	-	20,0	7,0	5,0	-	7,6	80
63,0	-	25,0	7,0	5,0	-	8,0	85
58,0	-	30,0	7,0	5,0	-	6,4	75
72,0	-	15,0	8,0	5,0	-	6,2	65
67,0	-	20,0	8,0	5,0	-	7,0	70
62,0	-	25,0	8,0	5,0	-	7,3	75
57,0	-	30,0	8,0	5,0	-	6,0	56
68,0	-	25,0	-	4,0	3,0	4,1	62
81,0	-	10,0	-	5,0	4,0	4,1	58
76,0	-	15,0	-	5,0	4,0	4,2	67
71,0	-	20,0	-	5,0	4,0	5,0	85
66,0	-	25,0	-	5,0	4,0	5,2	80
61,0	-	30,0	-	5,0	4,0	5,0	67
80,0	-	10,0	-	5,0	5,0	4,2	60
75,0	-	15,0	-	5,0	5,0	4,7	72
70,0	-	20,0	-	5,0	5,0	5,2	90
65,0	-	25,0	-	5,0	5,0	5,9	85

Анализ полученных данных показал, что введение наполнителя мелковолокнистого асбеста улучшает сцепление покрытия с предохраняемой поверхностью металла и повышает безопасность за счет увеличения огнестойкости конструкций. Так, увеличение содержания асбестоцементных отходов от 5 до 15% незначительно повышает адгезионную прочность и огнестойкость, наибольшая эффективность их влияния проявляется при содержании от 20 до 40%, адгезионная прочность повышается до 5,8-6,8 МПа, а безопасное время эксплуатации металлических конструкций (огнестойкость) до 50-55 мин. Отмечено, что оптимальное соотношение асбестоцементных отходов не должно превышать 30%, т.к. дальнейшее увеличение отрицательно сказывается на огнезащитных свойствах покрытия. Как показали исследования, введение асбестоцементных отходов в количестве более 30% с одной стороны способствует увеличению вязкости композиции, с другой, из-за высокой адсорбционной способности, ведет к комкованию смеси, отрицательно сказывающееся на смачивании композицией поверхности защищаемого металла.

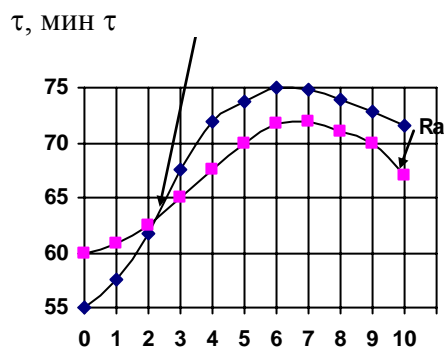
Исследования показали, что улучшение свойств покрытия может быть достигнуто введением цинковых белил (табл. 1, рис. 2). Так, введение в жидкостекольную композицию цинковых белил повышает огнезащитную способность покрытия, как за счет повышения величины вспучивания, так и повышения прочности контакта покрытия с предохраняемой поверхностью металла. Увеличение содержания цинковых

белил до 6,5-8,0% позволяет повысить адгезионную прочность до 7,2-7,3 МПа, а огнестойкость повышается до 70-75 мин. Дальнейшее увеличение содержания цинковых белил оказывает негативное влияние.



Содержание асбестоцементных отходов, %

Рис. 1. Изменение адгезионной прочности и огнестойкости покрытия в зависимости от содержания отходов: R_a – адгезионная прочность, МПа; τ – огнестойкость, мин.



Содержание асбестоцементных отходов, %

Рис. 2. Изменение адгезионной прочности и огнестойкости покрытия в зависимости от содержания цинковых белил (жидкое стекло: асбестоцементные отходы 75:25)

Для изучения взаимовлияния компонентов в рассматриваемой композиции нами при планировании экспериментов были приняты в качестве переменных параметров: x_1 – содержание жидкого стекла, масс, %; x_2 – содержание асбестоцементных отходов, масс, %; x_3 – содержание цинковых белил, масс, %.

Для моделирования зависимостей между принятыми показателями и переменными использован стандартный пакет статистической обработки STATGRAFICS 2.0, который является лицензированным программным обеспечением фирмы STATGRAFICS Corporation.

Согласно теории вероятности для корреляционно-регрессивного анализа, если многомерные случайные величины (исходные данные) имеют одинаковое распределение, то теоретически, линия регрессии выражается моделью вида: $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_nx_n$.

В результате исследования многомерной системы с помощью многомерного регрессивного анализа получена модель зависимости прогрева металла с покрытием до критической температуры от содержания входящих компонентов при толщине покрытия 1,0 мм

$$\tau=225,697-1,397x_1+2,019x_2-2,059x_3, \quad (1)$$

где τ – предел огнестойкости стальной пластины $\delta_{пр}=10$ мм, мин; x_1, x_2, x_3 – содержание компонентов, масс, %: оксид цинка, асбестоцементные отходы, жидкое стекло.

Детерминированность модели удовлетворительная, т.е. описа-

ние модели выбранными факторами достаточно полное. Коэффициент детерминации – сумма квадратов (остаточная) R-SQ (АД) сравнительно небольшая. Взаимосвязь компонентов x_1 , x_2 с исследуемым параметром (τ) очень тесная: коэффициенты корреляции $R_{yx1}=0,999$; $R_{yx2}=0,940$; $R_{yx3}=0,999$. Степень тесноты связи высокая. Выявлена весьма сильная связь между переменными факторами x_1 , x_2 и x_3 : $R_{x1x2}=0,938$; $R_{x1x3}=0,998$; $R_{x2x3}=0,929$.

В результате проверки модели (сравнение полученных расчетных значений с экспериментальными данными) установлено, что сумма всех отклонений (разностей расчетных и фактических) близка к нулю, что говорит о довольно полном описании происходящих процессов в модели.

Установлена зависимость изменения адгезионной прочности покрытия с предохраняемой поверхностью от содержания компонентов

$$R_a = -1,197 + 0,112x_1 + 0,405x_2 + 0,029x_3, \quad (2)$$

где R_a – адгезионная прочность, МПа; x_1 , x_2 , x_3 – содержание компонентов, масс, %.

Анализ полученной модели показал, что детерминированность модели удовлетворительная. Установлено, что между искомой функцией и переменными x_1 – жидким стеклом, x_2 – асбестоцементными отходами и x_3 – цинковыми белилами существует тесная связь: $R_{x1y}=0,999$; $R_{x2y}=0,940$; $R_{x3y}=0,999$; степень тесноты переменных: $R_{x1x2}=0,938$; $R_{x1x3}=0,998$; $R_{x2x3}=0,929$.

В результате проверки зависимости (2) установлено, что сумма всех отклонений (расчетных и фактических) равна нулю, что говорит о достаточно полном описании моделью происходящих процессов.

Полученная зависимость позволяет прогнозировать безопасное время нахождения людей на объекте до обрушения металлических конструкций, что дает возможность аварийно-спасательным службам уберечь личный состав от гибели и травматизма.

Полученные нами зависимости позволили установить, что входящие компоненты: жидкое стекло, асбестоцементные отходы, цинковые белила оказывают существенное влияние на огнезащитную способность покрытия, поэтому с учетом требований технологических параметров к огнезащитной композиции (табл.1) нами был определен оптимальный состав композиции для защиты металла, масс, %:

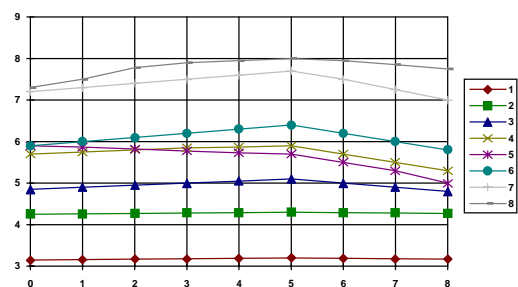
асбест или асбестоцементные отходы	20-35
цинковые белила	5-8
жидкое стекло	остальное

Новизна огнезащитной композиции подтверждена выдачей Госпатентом Украины патента на изобретение №22318А (в дальнейшем композиция ВЗП-Ж-2). Предложенная огнезащитная композиция в от-

личии от известных технологична. Так, применяемая огнезащитная композиция имеет хорошее начальное сцепление с покрываемой поверхностью металла и легко может быть достигнута требуемая толщина огнезащитного покрытия. Потеря при нанесении на вертикальные поверхности раствора огнезащитной композиции составляют 5-10%, что значительно меньше чем у известных.

Проведенные исследования показали, что повышение безопасности людей на объектах может быть достигнута повышением огнезащитной способности покрытия, введение кроме волокнистых наполнителей, тонкодисперсных с высокой огнеупорностью. Так, из табл.1 и рис. 3 и 4 видно, что введение тонкоизмельченного шамотного песка ($\rho=1000-1500 \text{ см}^2/\text{г}$) позволяет улучшить структуру композиции. Однако исследования показали, что только при определенном сочетании компонентов: жидкого стекла, асбестоцементных отходов и шамотного песка достигается наибольшая работоспособность покрытия. Установлено, что при введении в композицию 5-6% шамотного песка и содержания до 8% цинковых белил достигается наибольшая адгезионная прочность покрытия ($R_a=7,6-8,0 \text{ МПа}$) и огнестойкость достигает до 80-85 мин (толщина покрытия 5 мм).

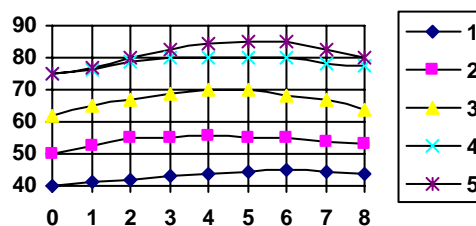
R, МПа



Содержание шамотного песка, масс, %

Рис. 3. Изменение адгезионной прочности покрытия в зависимости от содержания шамотного песка: 1 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 90:10; 2 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 85:15; 3 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 80:20; 4 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 75:25; 5 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 70:30; 6 – композиция: жидкое стекло: отходы: цинковые белила 73:15:7; 7 – композиция: жидкое стекло: отходы: цинковые белила 68:20:7; 8 – композиция: жидкое стекло: отходы: цинковые белила 63:25:7

τ , мин



Содержание шамотного песка, масс, %

Рис. 4. Изменение огнезащитной способности покрытия в зависимости от содержания в композиции шамотного песка: 1 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 90:10; 2 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы 80:20; 3 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: цинковые белила 73:15:7; 4 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: цинковые белила 68:20:7; 5 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: цинковые белила 63:25:7

Установлено, что введение наполнителя – шамотного песка в значительной степени предохраняет комкование смеси и способствует получению однородной массы. При этом просматривается взаимосвязь изменения огнезащитной способности покрытия от величины адгезионной прочности с предохраняемой поверхностью. Увеличение адгезионной прочности, по-видимому, связано с увеличением равномерного армирования в контактной зоне.

Исследования показали, что покрытие, содержащее шамотный песок и асбестоцементные отходы при вспучивании образует мелкопоризованную структуру по всему объему, что и определяет огнезащитную эффективность покрытия.

После обработки полученных данных (табл. 1, рис. 3 и 4) были установлены следующие математические зависимости.

Влияние входящих компонентов на огнезащитную способность покрытия (τ , мин)

$$\tau = 967,545 - 0,704x_1 - 9,412x_2 - 8,331x_3 - 9,720x_4, \quad (3)$$

где τ – огнестойкость металлических пластин, $\delta_{пр} = 10$ мм, мин; x_4 – содержание жидкого стекла, %; x_3 – содержание асбестоцементных отходов, %; x_2 – содержание цинковых белил, %; x_1 – содержание шамотного песка, %.

Анализ полученной зависимости (3) показал, что между входящими компонентами x_1 , x_2 , x_3 и x_4 и исходной функцией существует тесная взаимосвязь: $R_{yx1} = 0,618$; $R_{yx2} = 0,910$; $R_{yx3} = 0,994$; $R_{yx4} = 0,999$. По численным значениям коэффициентов модели можно сказать, что наибольшее влияние на изменение огнестойкости оказывает аргумент – жидкое стекло в сочетании с другими аргументами. Проверка модели путем сравнения полученных расчетных значений и исходных данных показала, что разность близка к нулю, что говорит об удовлетворительной подгонке модели.

Данная зависимость позволяет предварительно на стадии проектирования огнезащитной композиции по количественному соотношению компонентов определить безопасное время нахождения людей на объектах, что предупреждает возможность травмирования и гибели людей, повышает безопасность объекта в целом.

Влияние компонентов на адгезионную прочность покрытия:

$$R_a = 99,389 - 0,186x_1 - 0,737x_2 - 0,913x_3 - 1,00x_4. \quad (4)$$

Анализ полученной модели показал, что между входящими компонентами x_1 , x_2 , x_3 и x_4 и адгезионной прочностью существует устойчивая связь: $R_{yx1} = 0,618$; $R_{yx2} = 0,910$; $R_{yx3} = 0,998$; $R_{yx4} = 0,999$.

Устойчивая связь установлена и между аргументами $R_{x2x3} = 0,878$; $R_{x2x4} = 0,914$; $R_{x3x4} = 0,995$. Почти отсутствует взаимосвязь между аргу-

ментами $R_{x1x2}=0,376$. Сравнительная оценка полученных данных расчетным путем и исходных показала, что разность очень близка к нулю, что говорит о хорошем описании полученной модели процесса.

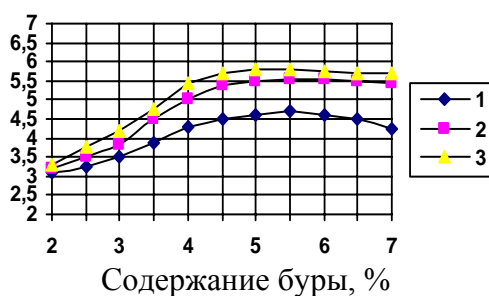
Проведенный анализ зависимостей с учетом технологических свойств позволил определить оптимальный состав огнезащитной композиции для защиты металлических конструкций, % по массе:

асбестоцементные отходы	15-25
оксид цинка	7-8
шамотный песок	5-6
жидкое стекло	остальное

В дальнейшем огнезащитная композиция получила название ВЗП-1А.

При введении в жидкостекольную композицию, содержащую асбестоцементные отходы и шамотный песок технической буры 4-5% достигается увеличение безопасного времени эксплуатации конструкций (огнестойкости) до 86-90 мин (табл. 1) При этом, установлено, что как уменьшение, так и увеличение содержания буры за указанный интервал оказывает негативное влияние на огнестойкость при сохранении довольно значимой величины адгезионной прочности покрытия 4,7-5,9 МПа. Отмечено, что увеличение контактной прочности покрытия с поверхностью достигается при содержании асбестоцементных отходов от 15 до 25%, шамотного песка от 4 до 6% и технической буры от 5 до 7% (рис. 5). Значительные изменения огнезащитной способности покрытия выявлены от содержания технической буры, которая значительно способствует поризации покрытия при огневом воздействии (рис. 6).

R, МПа



τ , мин

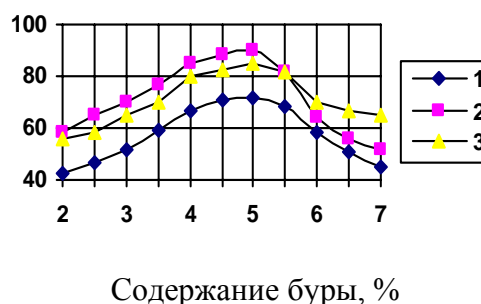


Рис. 5. Изменение адгезионной прочности покрытия в зависимости от содержания в композиции технической буры: 1 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 78:15:4; 2 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 73:20:5; 3 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 64:25:6

Рис. 6. Изменение огнезащитной способности покрытия в зависимости от содержания в композиции технической буры: 1 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 78:15:4; 2 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 73:20:5; 3 – композиция: жидкое стекло: асбестоцементные отходы: шамотный песок: 64:25:6

При уменьшении содержания буры менее 4% понижается поризация покрытия при вспучивании, что в конечном итоге сказывается на снижении огнезащитной эффективности. А увеличение содержания буры более 5% ведет к образованию крупнопористой структуры покрытия при вспучивании и снижению теплоизоляционных свойств, что подтверждают и натурные осмотры образцов.

После обработки полученных экспериментальных данных на ЭВМ (табл.1, рис.5 и 6) были получены следующие зависимости

$$\tau = -87,231 + 2,915x_1 + 6,950x_2 + 1,560x_3 + 1,444x_4, \quad (5)$$

где τ – предел огнестойкости стальной пластины $\delta_{пр}=10$ мм при толщине слоя покрытия 5мм, мин; x_4 – содержание жидкого стекла, %; x_3 – содержание асбестоцементных отходов, %; x_2 – содержание шамотного песка, %; x_1 – содержание технической буры, %.

Анализ полученной зависимости показал, что детерминированность модели удовлетворительная, что говорит о достаточно полном описании процесса выбранными факторами. Выявлено значительное влияние входящих компонентов: жидкого стекла и асбестоцементных отходов на исследуемый параметр (τ): $R_{x_4y}=0,963$; $R_{x_3y}=0,942$, очень тесная связь и взаимовлияние выявлено и между аргументами: $R_{x_1x_2}=0,827$; $R_{x_3x_4}=0,960$. Почти отсутствует связь аргументов: x_1 и x_3 , x_1 и x_4 , x_2 и x_3 . Сравнение полученных результатов расчетным путем и исходных данных показало, что сумма всех отклонений близка к нулю.

$$R_a = 1,069 + 0,422x_1 + 0,522x_2 + 0,048x_3 - 0,023x_4. \quad (6)$$

Детерминированность модели удовлетворительная. Установлено, что существенное влияние на адгезионную прочность оказывают компоненты: жидкое стекло, асбестоцементные отходы: $R_{x_3y}=0,942$; $R_{x_4y}=0,963$. Высоко взаимовлияние аргументов x_3 , x_4 и x_1 , x_2 : $R_{x_3x_4}=0,959$; $R_{x_1x_2}=0,827$.

Проверка модели (6) показала, что она хорошо описывает процесс и разность расчетных и фактических данных близка к нулю.

Проведенный анализ зависимостей (5) и (6) с учетом технологических свойств позволил найти оптимальный состав огнезащитной композиции для металла, % по массе:

асбестоцементные отходы	15-25
шамотный песок	5-6
техническая бура	4-5
жидкое стекло	остальное

Огнезащитная композиция получила название ВЗП-2А.

Выводы. Проведенные исследования позволили определить составы огнезащитных композиций, которые при высоких технологических свойствах, простоте нанесения, прошли успешно опытно-промышленные испытания в условиях производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беликов А.С. Теоретическое и практическое обоснование снижения горючести и повышения огнестойкости строительных конструкций за счет применения огнезащитных покрытий / Беликов А.С. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2000. – 196 с.

2. Копылов В.В. Полимерные материалы с пониженной горючестью / Копылов В.В. – М. : Химия, 1986. – 224 с.

3. Романенков И.Г. Огнезащита строительных конструкций / Романенков И.Г., Левитес Ф.А. – М. : Стройиздат, 1991. – 320 с.
nuczu.edu.ua

А.С. Беликов, В.А. Шаломов, С.Ю. Рагимов, М.М. Удянский

Підвищення пожежної безпеки за рахунок застосування спінюючих вогнезахисних композицій

Отримані залежності, які дозволяють прогнозувати безпечний час перебування людей на об'єкті до руйнування металевих конструкцій.

Ключові слова: математична залежність, вогнестійкість, вогнезахисна композиція, моделювання.

A.S. Belikov, V.A. Shalomov, S.Yu. Ragimov, M.M. Udianskij

Fire safety improvement through the use intumescent fireproof formulation

The dependencies that allow you to predict the safe time finding people on the subject until the collapse of the steel structures.

Keywords: mathematical relationship, fire resistance, flame retardant composition, modeling.