

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 547.2+544.03+536.46+691.1+699.81
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285>

Поступила в редакцию 22.05.2025
Received 22.05.2025

В. В. Богданова¹, О. И. Кобец¹, А. С. Платонов², А. Б. Перевозникова³, О. Н. Бурая¹

¹Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

²Университет гражданской защиты

Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

**ЗАВИСИМОСТЬ ОГНЕ-ТЕРМОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТИРОЛ-АКРИЛОВОГО
ТЕРМОВСПЕНИВАЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ОТ СООТНОШЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Аннотация. Для оптимизации огнестойких и термоизолирующих свойств базового огнезащитного термовспениваемого композита (ОТВК) использован метод математического планирования эксперимента, где варьируемыми факторами выбраны основные компоненты рецептурного состава композита: содержание (мас.%) стирол-акрилового связующего, газоккоксообразующей системы и термовспенивающего агента. С помощью адекватной регрессионной модели полного факторного эксперимента определены оптимальные соотношения компонентов в рецептуре ОТВК, построены поверхности функций отклика (потери массы, максимального приращения температуры при огневых испытаниях, коэффициента объемного вспенивания и относительной деформации сжатия пенококсового остатка), влияющих на огнестойкость композита. Показано, что лучшая по сравнению с исходным ОТВК огнестойкость оптимизированного композита, физико-механические характеристики продуктов термолитиза наряду с более высокой термостойкостью вносят существенный вклад в увеличение его термоизолирующей эффективности.

Ключевые слова: термовспениваемые композиты, математическое планирование эксперимента, огнестойкость, термоизолирующая эффективность

Для цитирования. Зависимость огне-термозащитных свойств стирол-акрилового термовспениваемого композиционного материала от соотношения основных компонентов / В. В. Богданова, О. И. Кобец, А. С. Платонов [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 4. – С. 271–285. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285>

V. V. Bogdanova¹, O. I. Kobets¹, A. S. Platonov², A. B. Perevznikova³, O. N. Buraya¹

¹Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

²University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus, Minsk, Belarus

³Belarusian State University, Minsk, Belarus

**DEPENDENCE OF FIRE-HEAT PROTECTIVE PROPERTIES OF STYRENE-ACRYLIC INTUMESCENT
COMPOSITE MATERIAL ON THE RATIO OF MAIN COMPONENTS**

Abstract. The method of mathematical planning of the experiment was employed to optimize the fire-resistant and thermal insulating properties of the basic fire-retardant thermal foamable composite (FRTC). The variable factors included the main components of the composite formulation: the content (wt.%) of styrene-acrylic binder, gas-coke-forming system and thermal foaming agent. Using an adequate regression model of a full factorial experiment, the optimal ratios of components in the FRTC formulation were determined. The response function surfaces (weight loss, maximum temperature increase during the fire test, volume-foaming coefficient and relative compression deformation of the intumescent residue) affecting the fire resistance of the composite were constructed. It was shown that the optimized composite exhibited enhanced fire resistance and improved physical-mechanical characteristics of the thermolysis products compared to the basic FRTC, along with higher thermal stability, which collectively significantly improve its thermal insulating efficiency.

Keywords: intumescent composites, fire-resistant properties, thermal insulation efficiency, mathematical planning of the experiment

For citation. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Platonov A. S., Perevoznikova A. B., Buraya O. N. Dependence of fire-heat protective properties of styrene-acrylic intumescent composite material on the ratio of main components. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, vol. 61, no. 4, pp. 271–285 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285>

Введение. Огнезащитные термовспениваемые композиционные материалы (ОТВК) в настоящее время широко востребованы в строительной отрасли как эффективные огне-термозащитные средства. Особенно актуально их применение в случае огнезащиты стальных, железобетонных конструкций, предотвращения распространения огня через межэтажные проходки по конструктивным элементам зданий и сооружений (воздуховоды, полимерные трубопроводы и изоляция кабелей) [1–6]. Огнезащитное действие ОТВК заключается в создании объемной термоизолирующей преграды из вспененных продуктов термоллиза, ограничивающей температурное воздействие на защищаемый материал в течение определенного времени (предела огнестойкости), что предохраняет конструкцию от разрушения.

В рецептурный состав эффективных ОТВК в качестве основных компонентов, как правило, входят пленкообразователь (связующее) и наполнители различной природы (кислото-, газообразующие, карбонизирующие агенты и/или металлсодержащие соединения и/или инертные наполнители) [7, 8]. Из связующих, включаемых в состав ОТВК, особенно часто в научных работах упоминаются пленкообразователи в виде водных дисперсий: акрилатных, сополимерных стирол-акриловых, этиленвинилацетатных [7, 9–12]. На предыдущих этапах исследования на примере водно-дисперсионных ОТВК нами установлено [13], что природа связующего оказывает влияние на характеристики композитов на их основе (физико-химические (эластичность, адгезионная способность), термические свойства (температуры плавления, терморазложения), физико-механические характеристики продуктов их прогрева (вспенивание, прочность коксового остатка)), а также на термоизолирующую эффективность ОТВК. При регулировании огнезащитных свойств ОТВК важен также выбор природы основных наполнителей, их соотношений. Так, в качестве кислото-, газо-, коксообразующих агентов в рецептурах традиционно используются полифосфат аммония (ПФА), дигидрофосфат аммония, меламин, гуанидин, дициандиамид, пентаэритрит (ПЭТ) и/или их фосфатные соли, терморасширяющийся графит (ТРГ) [11, 14–18]. Перечисленные активные наполнители способны вспенивать ОТВК в результате химического взаимодействия при нагревании в отличие от индивидуального ТРГ, который может применяться как самостоятельный термовспенивающий агент. Металлсодержащими добавками обычно служат диоксид титана, соединения алюминия, карбонаты кальция, магния или тетраборат цинка, а инертными наполнителями – силикатные минеральные соединения, например монтмориллонит, галлуазит [16–20].

В последнее время в литературных источниках встречаются разрозненные экспериментальные, а в большинстве своем расчетные данные о моделировании влияния компонентов – наполнителей различного состава на огнезащитные или термоизолирующие свойства ОТВК [4, 21, 22]. Однако при этом не учитываются влияющие на эти свойства физико-механические характеристики продуктов прогрева. Недостаточно также информации об оптимизации соотношений основных компонентов ОТВК для улучшения комплекса сразу нескольких заданных функциональных свойств композита, таких как огнезащитные, термоизолирующие, термические, и одновременно для повышения показателей вспенивания и механической прочности пенококка.

Ранее нами проведены исследования по оптимизации огнестойких, термоизолирующих свойств композита на основе термопластичного этиленвинилацетатного связующего с применением метода математического планирования эксперимента, что позволило отрегулировать рецептуру разрабатываемого эффективного термовспениваемого материала для превентивного огне-термозащитного устройства (противопожарной муфты) [23].

Для выявления общности или различия подходов к созданию термовспениваемых композиций с пониженной горючестью на основе термопластичного или водно-дисперсионного связующих в данной работе основной целью было определение методом математического планирования эксперимента компонентов, вносящих определяющий вклад в увеличение огне-термозащитной эффективности композита на основе водного стирол-акрилового связующего с учетом

физико-механических свойств его продуктов термоллиза. При этом важным отличительным условием являлось соответствие оптимизированного состава предъявляемым требованиям сразу по нескольким характеристикам, способным оказывать влияние на его термоизолирующие свойства: горючесть (потеря массы и максимальное приращение температуры), вспенивание и механическая прочность коксообразного остатка.

Материалы и методы. Для поиска оптимального рецептурного состава ОТВК с заданными свойствами использовали рецептуру композита (исходного ОТВК), включающую водно-дисперсионное сополимерное стирол-акриловое связующее (САС), огнезамедлительную газокксообразующую систему (ГКС) и терморасширяющийся графит (ТРГ) со следующим содержанием основных компонентов, мас. %: САС – 40,2, ТРГ – 13,3, ГКС – 46,5 (смесь полифосфата аммония, полигликоля, металкарбонатного минерала) [9].

Физико-механические свойства продуктов прогрева образцов ОТВК (вспенивание и механическая прочность) размером 10×20 мм после их 10-минутной термообработки при 500°C характеризовали коэффициентом объемного вспенивания (K_V) и относительной деформацией сжатия (ε , %), которые определяли по формулам (1) и (2):

$$K_V = V_{\text{всп}} / V_0, \quad (1)$$

$$\varepsilon = (h_{\text{всп}} - h_{\text{кон}}) / h_{\text{всп}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{всп}}$ – объем вспененного слоя прогретых продуктов, мм^3 ; V_0 – объем исходного образца, мм^3 ; $h_{\text{всп}}$ – высота вспененного слоя прогретых продуктов, мм; $h_{\text{кон}}$ – высота вспененного слоя после применения вертикально действующей нагрузки (80 Па), мм.

Пористость вспененных продуктов прогрева определяли по формуле (3) [24]:

$$\Pi = \left(1 - \frac{m \cdot V_0}{m_0 \cdot V}\right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где m_0 – исходная масса образца; m – масса вспененного образца после термического воздействия; V_0 – исходный объем образца; V – объем вспененного образца после термического воздействия.

Огнезащитные свойства ОТВК определяли согласно ГОСТ 12.1.044–89¹ (п. 4.3) по характеристикам горючести: потере массы (Δm , %) и максимальному приращению температуры отходящих газов (ΔT_{max} , $^\circ\text{C}$), полученным при огневых испытаниях образцов размером 10×100 мм в установке «Керамическая труба».

Термоизолирующие свойства образца ОТВК оценивали по времени достижения температуры 500°C на необогреваемой стороне огнезащищенной металлической пластины в ходе лабораторных испытаний в сопоставлении с незащищенной пластиной. Металлическая пластина (исходная или с образцом) крепилась на внутренней стороне дверцы камеры электропечи. Для термоизоляции металлической пластины на ее поверхность наносили образец ОТВК в составе конструктивной огнезащиты. Результаты сопоставительных испытаний для исследуемых образцов представляли в виде зависимости температура–время с определением предела огнестойкости (в мин).

Для получения оптимизированного состава ОТВК с заданными свойствами варьировали соотношения основных компонентов в рецептуре исходного композита с применением регрессионной модели полного факторного эксперимента (ПФЭ) [25]. При этом варьируемыми факторами ПФЭ выбирали содержание (мас. %) основных компонентов ОТВК: САС – x_1 , ТРГ – x_2 , ГКС – x_3 , численные значения которых в рецептуре ОТВК, полученные экспериментально, следующие, мас. %: $x_1 = 40,2$; $x_2 = 13,3$; $x_3 = 46,5$. Для упрощения расчетов использовали двухфакторную модель эксперимента (для факторов x_1 и x_2), так как в составе рецептуры ОТВК численные значения факторов в сумме должны составлять 100 %, следовательно, $x_3 = 100 \% - x_1 - x_2$. Центром плана 1 полного факторного эксперимента была выбрана точка $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = (40,2; 13,3)$.

¹ См.: Пожаровзрывоопасность веществ и материалов : ГОСТ 12.1.044-89. – Введен 01.01.1991. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 99 с.

Факторы варьировали на двух уровнях: $x_i = \tilde{x}_i \pm \Delta x_i$, $i = 1, 2$, где $\Delta x_1 = 5$, $\Delta x_2 = 6$, то есть $x_1 = 40,2 \pm 5$, $x_2 = 13,3 \pm 6$.

Изменения огнезащитных свойств композитов и физико-механических характеристик пенококов определялись четырьмя функциями отклика (y, w, q, z): y – потеря массы образца (Δm , %), w – максимальное приращение температуры ($\Delta T_{\max}$, °C), значения которых во время огневых испытаний согласно ГОСТ 12.1.044–89 для отнесения ОТВК к трудногорючим материалам должны быть менее 60 % и 60 °C соответственно; q – относительная деформация сжатия (ϵ , %) служила характеристикой механически прочных вспененных структур при $\epsilon < 10$ % на основании данных многочисленных экспериментов; z – коэффициент объемного вспенивания (K_V), оцениваемый по ГОСТ Р 12.3.047-2012¹, принимался удовлетворительным при $K_V \geq 10$.

Для описания методом ПФЭ зависимости характеристик горючести и физико-механических показателей от содержания компонентов ОТВК использовали регрессионную модель, описываемую в общем виде в натуральных переменных следующим уравнением регрессии:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j, \quad (4)$$

где число факторов $n = 2$.

Преобразованное уравнение регрессии ПФЭ в кодированных переменных для двухфакторного случая [26]:

$$\hat{y}^* = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (5)$$

$$\text{где } b_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k, \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ik} \bar{y}_k, \quad b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{1k} X_{2k} \bar{y}_k.$$

Матрица ПФЭ ($2^2 = N$) представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Матрица ПФЭ двухфакторного эксперимента [25]

Table 1. Matrix of the 2-factor model of the full factorial experiment [25]

Содержание плана	Опыт	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	y
План ПФЭ (2^2)	1	1	1	1	1	y_1
	2	1	1	–1	–1	y_2
	3	1	–1	1	–1	y_3
	4	1	–1	–1	1	y_4

П р и м е ч а н и е. X_0 – вспомогательный фактор, необходимый для удобства записи формул.

Для каждой i -той точки плана при реализации ПФЭ проводили серию из трех испытаний. Экстремальные результаты испытаний считали нормальными и не исключали из выборки, если максимальное $U_{i\max}$ и минимальное $U_{i\min}$ отклонения не превышали предельного отклонения $U_{\text{пред}}$:

$$U_{i\max} = \frac{y_{i\max} - \bar{y}_i}{S_i} < U_{\text{пред}}, \quad U_{i\min} = \frac{\bar{y}_i - y_{i\min}}{S_i} < U_{\text{пред}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{пред}}$ находили по ГОСТ 11.002–73². В качестве значения функции отклика принимали среднюю величину результатов серии, например $\bar{y}_i = (y_1 + y_2 + y_3) / 3$.

¹ См.: Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : ГОСТ 12.3.047-2012. – Взамен ГОСТ 12.3.047-98 ; введен 01.01.2014. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 86 с.

² См.: Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений : ГОСТ 11.002-73. – Введ. 15.01.1973. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 24 с.

Определение дисперсий результатов экспериментов, проверку однородности дисперсий по критерию Кохрена, вычисление дисперсий воспроизводимости эксперимента S_y^2 осуществляли ранее описанным нами методом [23].

Далее с помощью критерия Стьюдента проверялась значимость полученных коэффициентов $b_0, b_1 \dots b_{12}$. При этом коэффициент b регрессии (5) считался значим [25], если удовлетворял условию $|b| > t_{кр} S_{\{b\}}$, в котором среднеквадратичное отклонение коэффициентов определяли по формуле $S_{\{b\}} = S_y / \sqrt{mN}$, а критическое значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $N(m-1) = 4 \cdot 2 = 8$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ составило $t_{кр} = 2,306$.

К уравнению регрессии в натуральных переменных для двухфакторного случая

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (7)$$

переходили после отбрасывания незначимых коэффициентов с помощью подстановки $X_i = (x_i - \tilde{x}_i) / \Delta x_i$, где $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$ – центр плана.

Далее, как и ранее [23], проводили проверку полученной модели на адекватность с помощью критерия Фишера [25]. В случае адекватности модели осуществляли поиск экстремумов, которые для построенной модели могли оказаться лишь в точках $(\tilde{x}_1 - \Delta x_1, \tilde{x}_2 + \Delta x_2)$, $(\tilde{x}_1 + \Delta x_1, \tilde{x}_2 + \Delta x_2)$, $(\tilde{x}_1 - \Delta x_1, \tilde{x}_2 - \Delta x_2)$ и $(\tilde{x}_1 + \Delta x_1, \tilde{x}_2 - \Delta x_2)$.

Результаты и их обсуждение. Перед ПФЭ для исходного ОТВК получены предварительные данные экспериментов по характеристикам горючести (данные шести огневых испытаний) и физико-механическим свойствам пенококса (значения функций y, w, q, z) и их усредненные значения: $y = 66,2; 65,1; 57,0; 62,0; 60,2; 61,8$; $\bar{y} = 62,1$ %; $w = 28; 54; 23; 51; 82; 57$; $\bar{w} = 49,2$ °C; $q = 10,2; 8,4; 9,4$; $\bar{q} = 9,3$ %; $z = 26,0; 25,6; 27,0$; $\bar{z} = 26,2$.

При этом установлено, что в рассматриваемых диапазонах изменений факторов образцы не удовлетворяли условиям ГОСТ 12.1.044-89 по потере массы, а также по единичным значениям ΔT_{max} и/или ϵ . После проведения ПФЭ на основании результатов испытаний ОТВК показано (табл. 2, планы 1–4), что в рассматриваемых диапазонах изменений факторов для некоторых образцов значения Δm и ΔT_{max} не удовлетворяли стандартным условиям (значения были больше 60 % и/или 60 °C), а согласно испытаниям механической прочности пенококса определяемый показатель относительной деформации сжатия не всегда соответствовал требуемому значению ($\epsilon < 10$ %). Кроме того, построенные поверхности функций отклика (y, w, q, z) имели значительную кривизну.

Для нахождения оптимального соотношения компонентов рецептуры ОТВК, увеличения огнестойкости композита при сохранении удовлетворительных физико-механических свойств пенококса проведены эксперименты для семи планов ПФЭ (см. табл. 2). Последующие за первым центры плана сдвигались в сторону уменьшения потери массы так, чтобы в новом плане использовалась часть точек предыдущего плана, для которых опыты уже проведены. Снижение потери массы проводили при одновременном снижении значения отклика системы по максимальному приращению температуры (ΔT_{max}) и с получением удовлетворительных значений по относительной деформации сжатия (ϵ) и коэффициенту объемного вспенивания (K_v) с учетом условий их варьирования.

Т а б л и ц а 2. Экспериментальные значения откликов системы при варьировании значений факторов ПФЭ (2²)

Table 2. Experimental values of the system responses when varying the values of the factors of the FFE (2²)

Данные	Опыт	Реальные значения факторов, мас. %			Значения откликов системы серии опытов			
		САС (x_1)	ТРГ (x_2)	ГКС (x_3)	$y_i / \bar{y}$ (Δm , %)	$w_i / \bar{w}$ ($\Delta T_{\max}$, °C)	$q_i / \bar{q}$ (ε, %)	$z_i / \bar{z}$ (K_p)
План 1 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (40,2; 13,3; 46,5)$ и $\Delta x_1 = 5, \Delta x_2 = 6$								
План ПФЭ (2^2)	1	45,2	19,3	35,5	64; 63,8; 64,1 / 64,0	66; 61; 47 / 58	24,3; 18,9; 23,1 / 22,1	37,7; 32,6; 21,1 / 30,5

Продолжение табл. 2

Данные	Опыт	Реальные значения факторов, мас. %			Значения откликов системы серии опытов			
		САС (x_1)	ТРГ (x_2)	ГКС (x_3)	$y_i / \bar{y}$ (Δm , %)	$w_i / \bar{w}$ ($\Delta T_{\max}$, °C)	$q_i / \bar{q}$ (ε , %)	$z_i / \bar{z}$ (K_p)
	2	45,2	7,3	47,5	66,9; 66,9; 65,9 / 66,6	54; 63; 59 / 58,7	9,1; 2,0; 1,0; / 4,0	11,5; 12,1; 10,0 / 11,2
	3	35,2	19,3	45,5	59,1; 57,5; 55,7 / 57,4	48; 42; 52 / 47,3	23,3; 26,5; 23,5 / 24,4	37,3; 31,6; 51,2 / 40,0
	4	35,2	7,3	57,5	59,7; 60; 62,1 / 60,6	53; 57; 63 / 57,7	1,8; 3,6; 2,6 / 2,6	11,1; 12,2; 12,3 / 11,9
Центр плана	5	40,2	13,3	46,5	66,2; 65,1; 57; 62; 60,2; 61,8 / 62,1	28; 54; 23; 51; 82; 57 / 49,2	10,2; 8,4; 9,4 / 9,3	26,0; 25,6; 27,0 / 26,2
План 2 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (37,7; 14,3; 48,0)$ и $\Delta x_1 = 2,5, \Delta x_2 = 1$								
План ПФЭ (2^3)	1	40,2	15,3	44,5	60,8; 59,4; 61,3 / 60,5	59; 52; 67 / 59,3	12,6; 22,6; 19,0 / 18,1	31,6; 37,3; 31,1 / 33,3
	2	40,2	13,3	46,5	66,2; 65,1; 57; 62; 60,2; 61,8 / 62,1	28; 54; 23; 51; 82; 57 / 49,2	10,2; 8,4; 9,4 / 9,3	26,0; 25,6; 27,0 / 26,2
	3	35,2	15,3	49,5	57,8; 57,6; 57,8 / 57,7	42; 61; 49 / 50,7	23,8; 16,2; 19,0 / 19,7	34,2; 35,3; 39,7 / 36,4
	4	35,2	13,3	51,5	54,3; 58,8; 58,3 / 57,1	42; 58; 60 / 53,3	9,4; 7,8; 14,3 / 10,5	27,9; 28,6; 35,7 / 30,7
План 3 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (37,7; 12,3; 50,0)$ и $\Delta x_1 = 2,5, \Delta x_2 = 1$								
План ПФЭ (2^3)	1	40,2	13,3	46,5	66,2; 65,1; 57; 62; 60,2; 61,8 / 62,1	28; 54; 23; 51; 82; 57 / 49,2	10,2; 8,4; 9,4 / 9,3	26,0; 25,6; 27,0 / 26,2
	2	40,2	11,3	48,5	64; 63,8; 64,8 / 64,2	65; 70; 66 / 67	9,7; 15,3; 12,3 / 12,4	21,7; 27,6; 21,2 / 23,5
	3	35,2	13,3	51,5	54,3; 58,8; 58,3 / 57,1	42; 58; 60 / 53,3	9,4; 7,8; 14,3 / 10,5	27,9; 28,6; 35,7 / 30,7
	4	35,2	11,3	53,5	59,1; 59; 60,2 / 59,4	49; 58; 49 / 52	10; 3,3; 10,5 / 7,9	21,1; 24,4; 22,8 / 22,7
План 4 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (32,7; 10,8; 56,5)$ и $\Delta x_1 = 2,5, \Delta x_2 = 0,5$								
План ПФЭ (2^3)	1	35,2	11,3	53,5	59,1; 59; 60,2 / 59,4	49; 58; 49 / 52,0	10; 3,3; 10,5 / 7,9	21,1; 24,4; 22,8 / 22,7
	2	35,2	10,3	54,5	61,2; 60,9; 61,0 / 61,0	54; 59; 61 / 58,0	7,2; 2; 6,3 / 5,2	21,9; 22,2; 21,2 / 21,8
	3	30,5	11,3	58,5	57,2; 56,7; 55,7 / 56,5	37; 28; 56 / 40,3	9,8; 3,1; 10,2 / 7,7	24,5; 21,8; 21,7 / 22,7
	4	30,5	10,3	59,5	55,7; 56,2; 54,1 / 55,3	47; 46; 47 / 46,7	2,6; 3,2; 11,3 / 5,7	18,6; 19,9; 13,7 / 17,4
План 5 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (32,7; 11,05; 56,25)$ и $\Delta x_1 = 0,84, \Delta x_2 = 0,25$								
План ПФЭ (2^3)	1	33,54	11,3	55,16	58,6; 58,2; 57,2 / 58	41; 41; 44 / 42	2,1; 1,6; 6,9 / 3,5	21,1; 20,9; 22,8 / 21,6
	2	33,54	10,8	55,66	57,1; 58,9; 59,6 / 58,5	53; 50; 37 / 46,7	2,7; 1,5; 3,6 / 2,6	23,8; 18,3; 18,9 / 20,3
	3	31,86	11,3	56,84	57,3; 56,8; 56,4 / 56,8	25; 38; 52 / 38,3	4,6; 7,3; 3,9 / 5,3	21,0; 16,9; 21,0 / 19,7
	4	31,86	10,8	57,34	52,9; 55,5; 55,9 / 54,8	33; 32; 55 / 40,0	3,4; 3,6; 4,5 / 3,8	22,0; 21,2; 20,1 / 21,1

Окончание табл. 2

Данные	Опыт	Реальные значения факторов, мас.%			Значения откликов системы серии опытов			
		САС (x_1)	ТРГ (x_2)	ГКС (x_3)	$y_i / \bar{y}$ (Δm , %)	$w_i / \bar{w}$ ($\Delta T_{\max}$, °C)	$q_i / \bar{q}$ (ε, %)	$z_i / \bar{z}$ (K_p)
План 6 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (26,0; 10,8; 63,2)$ и $\Delta x_1 = 1, \Delta x_2 = 0,5$								
План ПФЭ (2^3)	1	27,0	11,3	61,7	52,8; 52,5; 54,2 / 53,2	47; 34; 33 / 38,0	9,7; 3,8; 6 / 6,5	23; 24; 26,7 / 24,6
	2	27,0	10,3	62,7	53,6; 55,7; 55,5 / 54,9	33; 33; 37 / 34,3	3,8; 5,3; 2,3 / 3,8	23,4; 22,9; 24,5 / 23,6
	3	25,0	11,3	63,7	51,8; 53,7; 53,5 / 53,0	18; 35; 42 / 31,7	6; 6,4; 6,9 / 6,4	22,7; 25,3; 24,2 / 24,1
	4	25,0	10,3	64,7	52,7; 52,1; 51,7 / 52,2	33; 34; 30 / 32,3	6,1; 6,9; 11,4 / 8,1	25; 23,4; 26,5 / 25,0
План 7 с центром в точке $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = (26,0; 8,8; 65,2)$ и $\Delta x_1 = 1, \Delta x_2 = 0,5$								
План ПФЭ (2^3)	1	27,0	9,3	63,7	54,3; 54,4; 55,2 / 54,6	29; 32; 25 / 28,7	7,9; 4,6; 5,8 / 6,1	20,2; 21,2; 23,7 / 21,7
	2	27,0	8,3	64,7	55,1; 53,9; 54,6 / 54,5	35; 25; 37 / 32,3	1,8; 3,4; 1,9 / 2,4	14,0; 15,1; 14,6 / 14,6
	3	25,0	9,3	65,7	53,7; 53,1; 53,1 / 53,3	29; 26; 27 / 27,3	2,1; 4,3; 2,2 / 2,9	17,5; 17,0; 17,1 / 17,2
	4	25,0	8,3	66,7	52,7; 52,9; 52,6 / 52,7	23; 31; 27 / 27,0	7,2; 5,9; 2,8 / 5,3	16,5; 15,4; 14,5 / 15,5

ОТВК, полученные по результатам плана 7, полностью удовлетворяли требуемым значениям. Необходимо отметить, что были предприняты попытки получения образцов ОТВК с еще более низким содержанием САС (20 %) и ТРГ (7 %), в результате которых выявлено нарушение требования к композиционному материалу по эластичности на изгиб – при испытании по ГОСТ 6806-73¹ происходило растрескивание материала в месте изгиба, а для продуктов его прогрева наблюдалось резкое снижение объемного вспенивания.

Найдена адекватная регрессионная модель, позволяющая определить оптимальный рецептурный состав ОТВК. Уравнения регрессии в кодированных переменных после обработки результатов ПФЭ (план 7) следующие:

$$\hat{y} = 53,8 + 0,7833X_1 + 0,1667X_2 - 0,1167X_1X_2, \quad (8.1)$$

$$\hat{w} = 28,8333 + 1,6667X_1 - 0,8333X_2 - X_1X_2, \quad (8.2)$$

$$\hat{q} = 4,1583 + 0,075X_1 + 0,325X_2 + 1,5417X_1X_2, \quad (8.3)$$

$$\hat{z} = 17,2367 + 0,895X_1 + 2,2033X_2 + 1,3483X_1X_2. \quad (8.4)$$

Дисперсии воспроизводимости опытов 1–4 плана 7 составили $S_{\{w\}}^2 = 18$, $S_{\{y\}}^2 = 0,19$, $S_{\{q\}}^2 = 2,56$, $S_{\{z\}}^2 = 1,14$. При этом дисперсия воспроизводимости $S_{\{w\}}^2$ хотя и принимает большое значение, однако оно значительно меньше по сравнению с аналогичной величиной первого эксперимента ($S_{\{w\}}^2 = 42$). Результаты расчета дисперсий по уравнению (7) и оценки значимости коэффициентов регрессии представлены в табл. 3.

¹ См.: Материалы лакокрасочные. Метод определения эластичности пленки при изгибе : ГОСТ 6806-73. – Введен 01.07.1974 ; переизд.: апрель 1988 г. – М: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.

Т а б л и ц а 3. Результаты оценки значимости коэффициентов регрессии

T a b l e 3. Results of assessing the significance of regression coefficients

Коэффициенты регрессии	b_0	b_1	b_2	b_{12}
Функция отклика потери массы y (Δm , %)				
b_i	53,8	0,7833	0,1667	–0,11667
$S_{\{b\}} = 0,125$	$t_{кр} S_{\{b\}} = 2,306 \cdot 0,125 = 0,28825$			
Значимость* (при $ b > t_{кр} S_{\{b\}}$)	+	+	–	–
Функция отклика максимального приращения температуры w (ΔT , °C)				
b_i	28,8333	0,1667	–0,8333	–1
$S_{\{b\}} = 1,2247$	$t_{кр} S_{\{b\}} = 2,306 \cdot 1,2247 = 2,8242$			
Значимость* (при $ b > t_{кр} S_{\{b\}}$)	+	–	–	–
Функция отклика относительной деформации сжатия q (ϵ , %)				
b_i	4,1583	0,0175	0,325	1,15417
$S_{\{b\}} = 0,4620$	$t_{кр} S_{\{b\}} = 2,306 \cdot 0,4620 = 1,0654$			
Значимость* (при $ b > t_{кр} S_{\{b\}}$)	+	–	–	+
Функция отклика объемного коэффициента вспенивания z (K_V)				
b_i	17,2367	0,895	2,2033	1,3483
$S_{\{b\}} = 0,3085$	$t_{кр} S_{\{b\}} = 2,306 \cdot 0,3085 = 0,7114$			
Значимость* (при $ b > t_{кр} S_{\{b\}}$)	+	+	+	+

П р и м е ч а н и е. «+» и «–» – значимые и незначимые коэффициенты регрессии.

После отбрасывания незначимых коэффициентов и перехода к натуральным переменным получили:

$$y = 33,4333 + 0,7833x_1, \quad (9.1)$$

$$w = 28,8333, \quad (9.2)$$

$$q = 709,63 - 27,1333x_1 - 80,1667x_2 + 3,0833x_1x_2, \quad (9.3)$$

$$z = 572,19 - 22,836x_1 - 65,707x_2 + 2,6967x_1x_2. \quad (9.4)$$

Отметим, что для q незначимые коэффициенты b_1 и b_2 при переходе к натуральным переменным преобразовались в ненулевые a_1 и a_2 . Проверка моделей (9.1)–(9.4) с помощью критерия Фишера показала их адекватность при уровне значимости $p = 0,05$. При этом дисперсии адекватности регрессий $S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$, где l – число значимых коэффициентов уравнения регрессии, составили:

$$S_{ад}^2(y) = \frac{3}{4-2} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \approx 0,25, \quad (10.1)$$

$$S_{ад}^2(w) = \frac{3}{4-1} \sum_{i=1}^N (\hat{w}_i - \bar{w}_i)^2 \approx 17,89, \quad (10.2)$$

$$S_{\text{ад}}^2(q) = \frac{3}{4-2} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_i - \bar{q})^2 \approx 0,67. \quad (10.3)$$

Составленные отношения дисперсий адекватности к дисперсиям воспроизводимости удовлетворяют критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = 0,25 : 0,19 \approx 1,32 < 4,46 = F_{0,95}(2;8) \text{ для } y, \quad (11.1)$$

$$F_{\text{расч}} = 17,89 : 18 \approx 0,99 < 4,07 = F_{0,95}(3;8) \text{ для } w, \quad (11.2)$$

$$F_{\text{расч}} = 0,67 : 2,56 \approx 0,26 < 4,46 = F_{0,95}(2;8) \text{ для } q. \quad (11.3)$$

Для показателя z обнаружено, что число степеней свободы дисперсии адекватности $f_{\text{ад}} = 0$, из чего следует, что все коэффициенты значимы, план насыщенный, поэтому проверка адекватности модели по Фишеру не требовалась.

Исследование функций y (9.1), q (9.3), z (9.4) показало следующее (рис. 1): наименьшее значение y принимает на прямой $x_1 = \tilde{x}_1 - \Delta x_1 = 25,0$ (рис. 1, *a*), причем $y(25,0) = 53,02$; для q минимальное значение оказалось в двух вершинах границы области изменения факторов x_1 и x_2 (рис. 1, *b*) – в точках $(25,0; 9,3)$ и $(27,0; 8,3)$ $q_{\min} = 2,62$; функция z принимает наибольшее значение в вершине границы области изменения факторов x_1 и x_2 (рис. 1, *c*) – в точке $(27,0; 9,3)$ $z_{\max} = 21,68$. Поверхности функций отклика, построенные по результатам ПФЭ плана 7 (рис. 1, *a–d*), представляют собой горизонтальную и наклонную плоскости (функции $w = \Delta T_{\max}$ и $y = \Delta m$), тогда

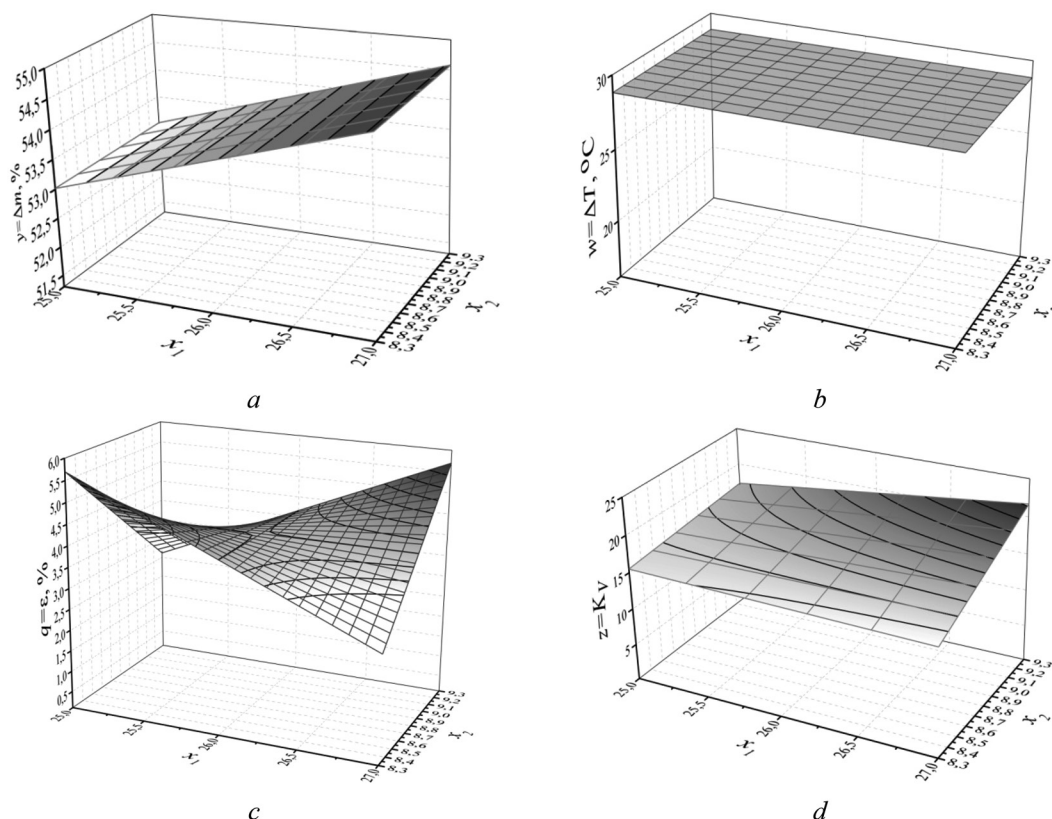


Рис. 1. Поверхности, построенные по уравнениям регрессий ПФЭ (план 7) в натуральных переменных для: *a* – потери массы; *b* – максимального приращения температуры; *c* – относительной деформации сжатия; *d* – коэффициента объемного вспенивания (использованы данные табл. 2, рассчитанные в программе Excel)

Fig. 1. Surfaces constructed using regression equations in natural variables of the FFE (plan 7) for: *a* – mass loss; *b* – maximum temperature increment; *c* – relative compression deformation; *d* – coefficient of volumetric foaming (data from Table 2, calculated in Excel)

как для функций $q = \varepsilon$ и $z = K_V$ все данные в зависимости от содержания САС (x_1) и ТРГ (x_2) графически изображены в более сложной форме.

Следовательно, с использованием метода математического планирования эксперимента установлены ряд рецептур ОТВК, удовлетворяющих принятым начальным условиям в диапазоне содержания основных компонентов, мас.%, а именно: САС : ТРГ : ГКС = (25,0... 27,0) : (8,3... 9,3) : (63,7... 66,7). Для дальнейших исследований отобран рецептурный состав ОТВК 7.3 (см. табл. 2, ОТВК 3 из плана 7), при котором эластичный на изгиб композиционный материал проявляет оптимальные характеристики по огнестойкости, механической прочности пенококса и удовлетворительную вспенивающую способность продуктов прогрева. Содержание основных компонентов в рецептуре отобранного оптимизированного композита следующее: 25,0 % САС, 9,3 % ТРГ и 65,7 % ГКС.

Далее проведены поисковые испытания термоизолирующих свойств ОТВК 7.3 в электропечи в широком температурном интервале от 30 до 800 °С, реализующемся в условиях сертификационных огневых испытаний. Одновременно в сопоставительном плане исследованы термические свойства оптимизированного и базового композитов (рис. 2, табл. 3) в том же интервале температур с определением физико-механических свойств их пенококса (табл. 4) при следующих температурах: 300 °С – начало вспенивания, 500 °С – достижение максимальной высоты вспенивания продуктов прогрева и 800 °С – начало интенсивного выгорания карбонизованного остатка.

Согласно комплексному термическому анализу (см. рис. 2, *a–c*) в температурном интервале 300–800 °С термодеструкция ОТВК 7.3 характеризуется по сравнению с ОТВК 1 снижением высоты максимального экзотермического эффекта (см. рис. 2, *a*, ДСК-кривая), меньшим (в 1,6 раза) показателем суммарного тепловыделения (см. табл. 4), а также более низкими показателями по общей потере массы и скорости потери массы (см. рис. 2, *b, c*, кривые ТГ и ДТГ). Полученные данные свидетельствуют о более высокой термостойкости композита ОТВК 7.3 по сравнению с исходным.

Данные о физико-механических свойствах обоих исследуемых композитов (табл. 5) свидетельствуют, что более эффективный ОТВК 7.3, по сравнению с ОТВК 1, характеризуется лучшими

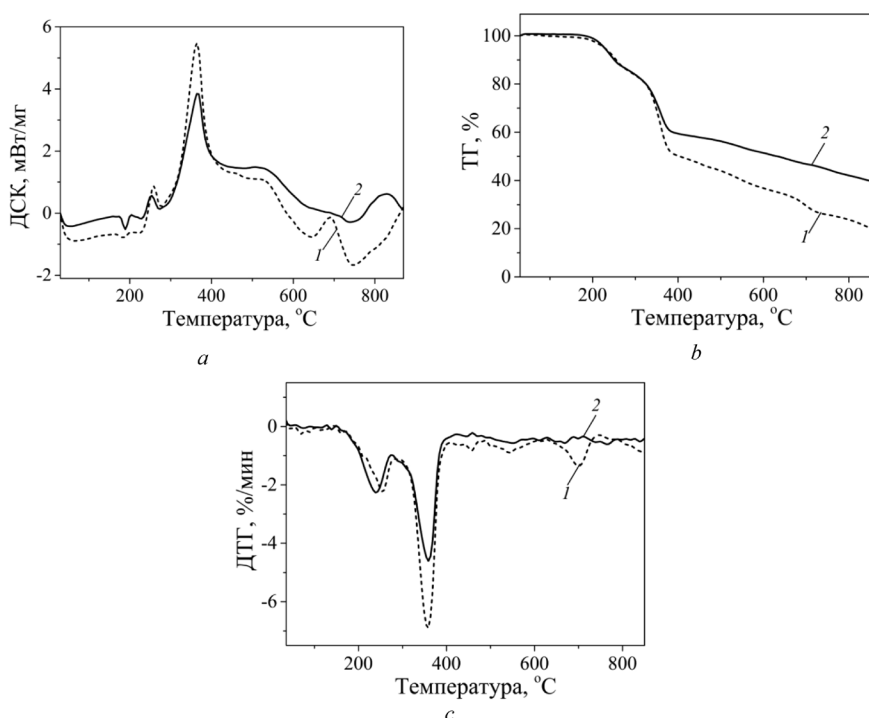


Рис. 2. Данные комплексного термического анализа: ДСК (*a*), ТГ (*b*), ДТГ (*c*) для: 1 – исходного ОТВК 1; 2 – оптимизированного ОТВК 7.3

Fig. 2. Data of complex thermal analysis (DSC (*a*), TG (*b*), DTG (*c*)) for: 1 – initial FRTC 1; 2 – optimized FRTC 7.3

(в 2,1 раза) показателями механической прочности пенококса и меньшей (в 2,5 раза) скоростью снижения показателя объемного вспенивания в высокотемпературной области (500–800 °С). В этих же условиях в случае ОТВК 7.3 в отличие от ОТВК 1 зафиксированы большие значения остаточного содержания пенококса и его плотности при сопоставимой пористости (П, %), а по внешнему виду карбонизованный остаток сформирован более компактно, с четкими контурами, без трещин.

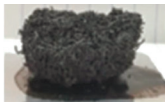
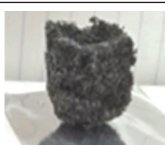
Таблица 4. Результаты ДСК- и ТГ-анализов для ОТВК 1 и ОТВК 7.3

Table 4. Results of DSC and TG for FRTC 1 and FRTC 7.3

ОТВК	ДСК				ТГ	
	ΣQ , Дж/г (30–800, °С)	$T_{\text{эндо-эф.}}$, °С	$T_{\text{тах экзо-эф.}}$, °С	$h_{\text{тах экзо-эф.}}$, мВт/мг	$\Delta m_{\text{тах.}}^{\text{г}}$, % (T , °С)	$m_{\text{общ.}}$, %
ОТВК 1	6039	185,4	364	6,22	33,77 (277–410)	76,2
ОТВК 7.3	3791	189,5	366	4,00	27,37 (277–415)	57,9

Таблица 5. Физико-механические свойства и внешний вид пенококсов базового и оптимизированного ОТВК в широком интервале температур

Table 5. Physical and mechanical properties and appearance of foam cokes of the basic and optimized FRTC in a wide temperature range

Обозначение ОТВК	T , °С	Физико-механические свойства и внешний вид пенококс				
		ε , %	K_V	Остаточное содержание, %	ρ , г/см ³ (П, %)	Внешний вид
Исходный ОТВК 1	300	0*	2*	92,9	0,3692 (53,7)	
	500	9,3	26,2	40,9	0,0157 (98,1)	
	800	31,1	16,2	28,6	0,0113 (98,6)	
ОТВК 7.3	300	1,4	4,2	89,9	0,1874 (78,8)	
	500	2,9	17,2	51,3	0,0264 (97,0)	
	800	14,6	13,4	38,9	0,0276 (97,1)	

* – образец оплавлен.

На основании полученных в исследуемом температурном интервале улучшенных характеристик ОТВК 7.3 по огнестойкости, термическим свойствам, механической прочности пенококса и удовлетворительном вспенивании предположено, что оптимизированный композит проявит также высокую термоизолирующую эффективность. Термоизолирующие свойства исследуемых ОТВК 7.3 и ОТВК 1 представлены на рис. 3.

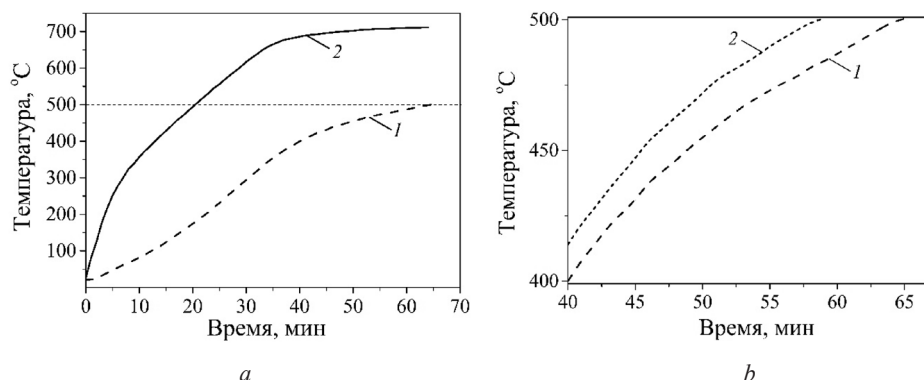


Рис. 3. Зависимость температура–время на необогреваемой поверхности металлической пластины для:
 а – огнезащитной ОТВК 7.3 (1) и исходной металлической пластины (2);
 б – пластин, огнезащитных ОТВК 7.3 (1), ОТВК 1 (2)

Fig. 3. Temperature vs. time dependence on the unheated surface of a metal plate for:
 а – fire-protected FRTC 7.3 (1) and the original metal plate (2); б – plates fire-protected with FTFC 7.3 (1), FRTC 1 (2).

При анализе зависимости температура–время, построенной по результатам испытаний термоизолирующих свойств ОТВК 7.3 по сравнению с пластиной без термозащиты (рис. 3, а), установлено, что время достижения критической температуры (предел огнестойкости), при которой металл теряет механическую прочность (500 °C), для образца в присутствии ОТВК 7.3 составляло больше часа (64 мин), тогда как для пластины без термозащиты ~20 мин. Необходимо отметить, что образец в присутствии оптимизированного композита по сравнению с образцом с ОТВК 1 эффективнее замедляет рост температуры на необогреваемой поверхности металлической пластины (рис. 3, б): например, на 40-й минуте испытания разрыв в температурах составлял 13 °C, на 55-й – более 20 °C.

Полученные экспериментальные данные по оптимизации рецептурного состава огнезащитного стирол-акрилового композита согласуются с ранее опубликованными результатами математического планирования эксперимента для композита на основе термопластичного этиленвинилацетатного связующего [23]: в обоих случаях усилению огне-термозащитных свойств способствовало варьирование факторов в сторону увеличения содержания в улучшенных рецептурах азот-фосфорсодержащего компонента, а также образование механически устойчивых в широком интервале температур (от 300 до 800 °C) пенококсовых структур.

Выводы. Методом математического планирования эксперимента проведена оптимизация рецептурного состава термовспениваемого композита на основе водно-дисперсионного стирол-акрилового связующего, в результате чего улучшены его огнестойкие свойства и одновременно усилены физико-механические характеристики продуктов прогрева.

На основе адекватной регрессионной модели полного факторного эксперимента определены соотношения компонентов в рецептуре оптимизированного ОТВК. Построены поверхности функций откликов, влияющих на огнестойкость композита, – потери массы, максимального приращения температуры, объемного вспенивания и относительной деформации сжатия пенококсового остатка.

Для оптимизированного композита по сравнению с исходным в широком интервале температур (300–800 °C) установлена более высокая термостойкость и лучшая прочность пенококсов при удовлетворительном вспенивании, что наряду с оптимальными огнестойкими свойствами оказало существенное влияние на увеличение его термоизолирующей эффективности.

Список использованных источников

1. Мельдер, Е. В. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций / Е. В. Мельдер, А. Б. Сивенков // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 1 (95). – С. 49–65. <https://doi.org/10.25257/TTS.2022.1.95.49-65>
2. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures / L. Vakhitova, K. Kalafat, R. Vakhitov, V. Drizhd // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 4. – Art. e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>

3. Current Advances in Flame-Retardant Performance of Tunnel Intumescent Fireproof Coatings: A Review / G. Tang, C. Shang, Y. Qin, J. Lai // *Coatings*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 1–33. <https://doi.org/10.3390/coatings15010099>
4. Гаращенко, А. Н. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) / А. Н. Гаращенко, А. А. Берлин, А. А. Кульков // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2019. – Т. 28, № 2. – С. 9–30. <https://doi.org/10.18322/pvb/2019.28.02.9-30>
5. Intumescent compounds for fireproofing of polymer pipelines / V. V. Bogdanova, O. I. Kobets, O. N. Buraya [et al.] // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – № 8. – Art. 11607. <https://doi.org/10.34910/MCE.116.7>
6. Novak, S. Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure / S. Novak, V. Drizhd, O. Dobrostan // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 3, № 10. – P. 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206373>
7. Waterborne Intumescent Fire Retardant Polymer Composite Coatings: A Review / Y. Li, C. F. Cao, Z. Y. Chen [et al.] // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, № 16. – Art. 2353. <https://doi.org/10.3390/polym16162353>
8. Zubielewicz, M. Trends in the development of intumescent paints for the protection of steel structures and new related with them expectations / M. Zubielewicz, E. Langer, A. Królikowska // *Ochrona przed Korozją*. – 2021. – № 7. – P. 212–220. <https://doi.org/10.15199/40.2021.7.1>
9. Effect of binder on performance of intumescent coatings / J. T. Pimenta, C. Goncalves, L. Hiliou [et al.] // *Journal of Coatings Technology and Research*. – 2015. – Vol. 13. – P. 227–238. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9737-5>
10. Definition of the thermal and fire-protective properties of ethylene-vinyl acetate copolymer nanocomposites / V. Bessarabov, N. Taran, G. Zagoriy, L. Vakhitova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 1, № 6. – P. 13–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154676>
11. Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers / M. M. S. M. Sabee, Z. Itam, S. Beddu [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 14. – P. 2911–2944. <https://doi.org/10.3390/polym14142911>
12. Dong, F. Smoke Suppression Properties of Fe₂O₃ on Intumescent Fire-Retardant Coatings of Styrene–Acrylic Emulsion / F. Dong, Q. Song, L. Ma // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, № 7. – P. 850–863. <https://doi.org/10.3390/coatings14070850>
13. Влияние природы пленкообразующих агентов на термозащитные свойства вспениваемых композиций / В. В. Богданова, О. И. Кобец, О. Н. Бурая, А. Б. Перевозникова // *Горение и взрыв*. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 37–46. <https://doi.org/10.30826/CE22150105>
14. Diaconu, B. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods and Applications – A Literature Review / B. Diaconu, M. Cruceru, L. Anghelescu // *Fire*. – 2023. – Vol. 6, № 5. – Art. 175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
15. Богданова, В. В. Влияние каркасообразующих добавок на горючесть, термические свойства и механическую прочность продуктов прогрева термовспениваемых композитов / В. В. Богданова, О. И. Кобец, А. Б. Перевозникова // *Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: Композит-2022 : сб. матер. – Энгельс, 2022. – С. 161–165.*
16. Mastalska-Popławska, J. Effect of Modified Halloysite/Expandable Graphite Addition on Thermal and Intumescent Properties of the Fire-Resistant Paints for Steel / J. Mastalska-Popławska // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 48. – P. 16087–16095. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07998-0>
17. Effect of Dolomite Clay on Thermal Performance and Char Morphology of Expandable Graphite Based Intumescent Fire Retardant Coatings / Q. F. Gillani, F. Ahmad, M. I. A. Mutalib [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 148. – P. 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.505>
18. Improved pyrolysis behavior of ammonium polyphosphate-melamine-expandable (APP-MEL-EG) intumescent fire retardant coating system using ceria and dolomite as additives for I-beam steel application / J. B. Zoleta, G. B. Itao, V. J. T. Resabal [et al.] // *Heliyon*. – 2019. – Vol. 6, № 1. – Art. e03119. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03119>
19. Research progress of carbon-based materials in intumescent fire-retardant coatings: A review. / W. Zhan, Z. Xu, L. Chen [et al.] // *European Polymer Journal*. – 2024. – Vol. 220. – Art. 113486. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113486>
20. Effect of the B : Zn : H₂O Molar Ratio on the Properties of Poly(Vinyl Acetate) and Zinc Borate-Based Intumescent Coating Materials Exposed to a Quasi-Real Cellulosic Fire / J. Łopinski, B. Schmidt, Y. Bai [et al.] // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, № 11. – P. 2542–2556. <https://doi.org/10.3390/polym12112542>
21. Lucherini, A. Modelling intumescent coatings for the fire protection of structural systems: a review / A. Lucherini, D. de Silva // *Journal of Structural Fire Engineering*. – 2024. – Vol. 15, № 4. – P. 483–507. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2023-0038>
22. Кузнецова, Д. А. Многофакторная количественная оптимизация огнезащитной эффективности интумесцентных огнезащитных материалов / Д. А. Кузнецова, Н. В. Яшин, В. В. Авдеев // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2024. – Т. 33, № 3. – С. 11–21. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.11-21>
23. Оптимизация огнестойких и термоизолирующих свойств вспениваемых композитов с привлечением математического планирования эксперимента / В. В. Богданова, О. И. Кобец, А. С. Платонов, А. Б. Перевозникова // *Горение и взрыв*. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 62–72. <https://doi.org/10.30826/CE23160306>
24. Зверев, В. Г. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий / В. Г. Зверев, А. В. Теплоухов, А. Ф. Цимбалюк // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 8-2. – С. 148–153.
25. Володарский, Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е. Т. Володарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1987. – 280 с.
26. Кононюк, А. Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента) : в 4 кн. / А. Е. Кононюк. – Киев, 2011. – Кн. 2. – 452 с.

References

1. Mel'der E. V., Sivenkov A. B. Efficiency of a combination of intumescent coatings for fire protection of steel structures. *Technology of Technosphere Safety*, 2022, no. 1 (95), pp. 49–65 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2022.1.95.49-65>
2. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 4, art. e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>
3. Tang G., Shang C., Qin Y., Lai J. Current Advances in Flame-Retardant Performance of Tunnel Intumescent Fireproof Coatings: A Review. *Coatings*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 1–33. <https://doi.org/10.3390/coatings15010099>
4. Garashchenko A. N., Berlin A. A., Kul'kov A. A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvbezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 9–30 (in Russian). <https://doi.org/10.18322/pvb/2019.28.02.9-30>
5. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Buraya O. N., Ustinov A. A., Zybina O. A. Intumescent compounds for fireproofing of polymer pipelines. *Magazine of Civil Engineering*, 2022, no. 8, pp. 1–11. art. 11607. <https://doi.org/10.34910/MCE.116.7>
6. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O. Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 3, no. 10, pp. 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206373>
7. Li Y., Cao C.-F., Chen Z.-Y., Liu S.-C., Bae J., Tang L.-C. Water-borne Intumescent Fire Retardant Polymer Composite Coatings: A Review. *Polymers*, 2024, vol. 16, iss. 16, art. 2353. <https://doi.org/10.3390/polym16162353>
8. Zubielewicz M., Langer E., Królikowska A. Trends in the development of intumescent paints for the protection of steel structures and new related with them expectations. *Ochrona przed Korozją [Corrosion Protection]*, 2021, no. 7, pp. 212–220. <https://doi.org/10.15199/40.2021.7.1>
9. Pimenta J. T., Goncalves C., Hiliou L., Coelho J. F. J., Magalhaes F. D. Effect of binder on performance of intumescent coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2015, vol. 13, pp. 227–238. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9737-5>
10. Bessarabov V., Taran N., Zagoriy G., Vakhitova L. Definition of the thermal and fire-protective properties of ethylene-vinyl acetate copolymer nanocomposites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 1, no. 6, pp. 13–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154676>
11. Sabee M. M. S. M., Itam Z., Beddu S., Zahari N. M., Kamal N. L. M., Mohamad D., Zulkepli N. A., Shafiq M. D., Hamid Z. A. A. Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 14, pp. 2911–2944. <https://doi.org/10.3390/polym14142911>
12. Dong F., Song Q., Ma L. Smoke Suppression Properties of Fe₂O₃ on Intumescent Fire-Retardant Coatings of Styrene-Acrylic Emulsion. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 7, pp. 850–863. <https://doi.org/10.3390/coatings14070850>
13. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Buraya O. N., Perevoznikova A. B. The influence of the nature of film-forming agents on the thermal protection properties of foamed compositions. *Goreniye i vzryv = Combustion and explosion*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 37–46 (in Russian). <https://doi.org/10.30826/CE22150105>
14. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods and Applications – A Literature Review. *Fire*, 2023, vol. 6, no. 5, art. 175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
15. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Perevoznikova A. B. The influence of frame-forming additives on the flammability, thermal properties and mechanical strength of the heating products of thermally foamed composites. *Perspektivnyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. Al'ternativnyye tekhnologii. Pererabotka. Primeneniye. Ekologiya: Kompozit-2022 : sb. mater.* [Promising polymer composite materials. Alternative technologies. Processing. Application. Ecology: Composite-2022 : collection of materials]. Engels, 2022, pp. 161–165 (in Russian).
16. Mastalska-Popławska J. Effect of Modified Halloysite/Expandable Graphite Addition on Thermal and Intumescent Properties of the Fire-Resistant Paints for Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, pp. 16087–16095. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07998-0>
17. Gillani Q. F., Ahmad F., Mutalib M. I. A., Melor P. S., Ullah S., Arogundade A. Effect of Dolomite Clay on Thermal Performance and Char Morphology of Expandable Graphite Based Intumescent Fire Retardant Coatings. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 148, pp. 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.505>
18. Zoleta J. B., Itao G. B., Resabal V. J. T., Lubguban A. A., Corpuz R. D., Ito M., Hiroyoshi N., Tabelin C. B. Improved pyrolysis behavior of ammonium polyphosphate-melamine-expandable (APP-MEL-EG) intumescent fire retardant coating system using ceria and dolomite as additives for I-beam steel application. *Heliyon*, 2019, vol. 6, iss. 1, art. e03119. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03119>
19. Zhan W., Xu Z., Chen L., Li L., Kong Q., Chen M., Zhang Q., Jiang J. Research progress of carbon-based materials in intumescent fire-retardant coatings: A review. *European Polymer Journal*, 2024, vol. 220, art. 113486. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113486>
20. Łopinski J., Schmidt B., Bai Y., Kowalczyk K. Effect of the B : Zn : H₂O Molar Ratio on the Properties of Poly(Vinyl Acetate) and Zinc Borate-Based Intumescent Coating Materials Exposed to a Quasi-Real Cellulosic Fire. *Polymers*, 2020, vol. 12, iss. 11, pp. 2542–2556. <https://doi.org/10.3390/polym12112542>
21. Lucherini A., de Silva D. Modelling intumescent coatings for the fire protection of structural systems: a review. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2024, vol. 15, no. 4, pp. 483–507. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2023-0038>
22. Kuznetsova D. A., Yashin N. V., Avdeyev V. V. Multifactorial quantitative optimization of fire protection efficiency of intumescent fire protection materials. *Pozharovzryvbezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2024, vol. 33, no. 3, pp. 11–21 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.11-21>

23. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Platonov A. S., Perevoznikova A. B. *Optimization of fire-resistant and thermal insulation properties of foamed composites using mathematical planning of experiments. Gorennye i vzryvy = Combustion and explosion*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 62–72 (in Russian). <https://doi.org/10.30826/CE23160306>
24. Zverev V. G., Teploukhov A. V., Tsimbalyuk A. F. Study of the properties and fire protection efficiency of intumescent coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika [News of Higher Education Institutions. Physics]*, 2014, vol. 57, no. 8-2, pp. 148–153 (in Russian).
25. Volodarskiy E. T., Malinovskiy B. N., Tuz Yu. M. *Planning and organizing a measurement experiment*. Kiev, Vishha shkola Publ., 1987. 280 p. (in Russian).
26. Kononyuk A. E. *Fundamentals of Scientific Research (General Theory of Experiment)*. Book. 2. Kyiv, 2011. 452 p. (in Russian).

Информация об авторах

Богданова Валентина Владимировна – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией. Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogdanova@bsu.by; <https://orcid.org/0000-0002-8557-9925>.

Кобец Ольга Игоревна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник. Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kobetsoi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6702-7430>

Платонов Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Беларусь). E-mail: alexpltn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5463-6029>

ПЕРЕВОЗНИКОВА Анна Борисовна – аспирант. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.b.perevoznikova@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6553-4399>

Бурая Оксана Николаевна – научный сотрудник. Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 727989erucamide@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6241-1281>

Information about the authors

Bogdanova Valentina V. – Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Research Institute for Physical Chemical Problems of BSU (14, Leningradskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogdanova@bsu.by; <https://orcid.org/0000-0002-8557-9925>

Kobets Olga I. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Research Institute for Physical Chemical Problems of BSU (14, Leningradskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kobetsoi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6702-7430>

Platonov Aleksandr S. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus (25, Mashinostroiteley Str., 220118, Minsk, Belarus). E-mail: alexpltn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5463-6029>

Perevoznikova Anna B. – Postgraduate Student. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.b.perevoznikova@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6553-4399>

Buraya Oksana N. – Researcher. Research Institute for Physical Chemical Problems of BSU (14, Leningradskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 727989erucamide@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6241-1281>