

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕМОНТА И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТРАНСПОРТЕ

**Акимов А. В.**, старший преподаватель кафедры судовых энергетических установок и общинженерной подготовки Херсонской государственной морской академии, E-mail: akimoffsasha@hotmail.com;

**Михайлик В. Д.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок и общинженерной подготовки Херсонской государственной морской академии, E-mail: ksma@ksma.ks.ua;

**Бень А. П.**, к.т.н., доцент, проректор по научно-педагогической работе Херсонской государственной морской академии, E-mail: arbarb@pochta.ru;

**Ивченко Т. И.**, к.т.н., доцент, доцент кафедры технической механики, инженерной и компьютерной графики Херсонской государственной морской академии, E-mail: Galina\_angel@bigmir.net;

**Гнатов А. В.**, д.т.н., доцент, профессор кафедры автомобильной электроники Харьковского автомобильно-дорожного университета, E-mail: kalifus@yandex.ua, ORCID: 0000-0003-0932-8849

*Представлена оптимизация результатов экспериментальных исследований состава защитных покрытий, предназначенных для восстановления и ремонта элементов транспортных энергетических установок, что ведет к повышению эффективности их эксплуатации. В результате проведенной оптимизации получены оптимальные значения концентраций наполнителей в трехкомпонентных бидисперсных защитных полимеркомпозитных покрытиях с улучшенными адгезионными, физико-механическими и теплофизическими свойствами.*

*Ключевые слова:* оптимизация, защитные покрытия, полимеркомпозит.

**Постановка проблемы.** К актуальным проблемам современного материаловедения относятся: недостаточная прочность защитных покрытий; их теплофизические и физико-механические свойства; отсутствие теоретических основ упрочнения поверхности и защиты деталей судовых энергетических установок (СЭУ) и практических рекомендаций по повышению эксплуатационной надежности композитных материалов (КМ). Развитие промышленности в современных условиях невозможно без использования полимерных материалов и, особенно, защитных покрытий на их основе, которые отличаются повышенными показателями теплофизических и физико-механических свойств, незначительной токсичностью и горючестью. Для деталей энергетических установок, в том числе и судовых, эксплуатируемых под действием высоких температур и давлений, перспективным является использование защитных покрытий на основе полимеров. Важнейшими характеристиками указанных покрытий являются: тепло- и огнестойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред (топливо, масло, вода, газы и пары, ПАВ и др.) [1–11]. Таким образом выбор состава защитных покрытий и технологии их нанесения является актуальной задачей современного материаловедения, поскольку структура и толщина адгезивов, их оптимальные адгезионные, теплофизические и физико-механические свойства зависят от многих факторов. Одним из факторов, влияющих на улучшение свойств защитных покрытий является использование двух- и более компонентных бидисперсных наполнителей [12]. Поэтому для выбора оптимального состава защитных покрытий, технологии получения и нанесения, а также их дальнейшего применения необходимы сведения о механизме разрушения КМ, а также исследование влияния различных факторов на прочность и долговечность композитов, которые невозможны без предварительных экспериментальных исследований [13].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Применение оптимизации состава двух- и более компонентных бидисперсных наполнителей с использованием

методов статистики и прогнозирования позволяет определить технологические параметры, обеспечивающие как улучшение адгезионных, физико-механических и теплофизических свойств, а также долговечность покрытий, так и обладающие лучшей огнестойкостью. Применение методов математической статистики и обработки результатов экспериментов дает возможность за короткий период времени оптимизировать содержание наполнителей для формирования покрытий с улучшенными свойствами [3].

**Целью работы** является оптимизация состава трехкомпонентного наполнителя-антипирена для защитных огнестойких покрытий на основе эпоксикомпозитов, пластифицированных трихлорэтилфосфатом для элементов энергетических установок.

**Материалы и методы исследования.** Исследованы составы на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-93) с молекулярной массой 360...470, содержащей 21,5 % эпоксидных групп.

В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применяли отвердитель аминного типа – полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594-85), способный формировать трехмерную сетчатую структуру в отсутствие нагрева. Химическая формула ПЭПА –  $H_2N(CH_2CH_2NH)_nH$ , где  $n = 1...4$ , динамическая вязкость – 0,9 Па·с.

В качестве пластификатора применяли трихлорэтилфосфат (ТХЭФ) (ТУ 6-05-1611-78). Молекулярная масса ТХЭФ – 285,49; внешний вид – низковязкая прозрачная маслянистая жидкость; химическая формула –  $C_6H_{12}Cl_3O_4P$ . При введении в композицию ТХЭФ получают материал, горение которого быстро прекращается после нивелирования действия открытого пламени.

Эпоксидное связующее формировали по следующей технологии: дозирование компонентов, гидродинамическое совмещение пластификатора и эпоксидной диановой смолы ЭД-20 до получения однородной смеси и последующего полного растворения добавки в течение времени  $\tau = 2 \pm 0,1$  мин при комнатной температуре  $T = 298 \pm 2$  К, ультразвуковая обработка продолжительностью  $\tau = 2 \pm 0,1$  мин, введение отвердителя ПЭПА и гидродинамическое совмещение компонентов в течение времени  $\tau = 2 \pm 0,1$  мин, отверждение композиции. Отверждение КМ проводили по экспериментально установленному режиму: формирование образцов и их выдержка в течение  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  ч при температуре  $T = 298 \pm 2$  К, нагрев со скоростью  $v = 3$  К/мин до выбранных температур сшивания  $T = 393 \pm 2$  К и  $T = 413 \pm 2$  К [10] (принято по результатам предварительного исследования адгезионных и физико-механических свойств исследуемых композитов), выдержка образцов при данной температуре в течение времени  $t = 2,0 \pm 0,05$  ч, медленное охлаждение до температуры  $T = 298 \pm 2$  К. С целью стабилизации структурных процессов в матрице образцы выдерживали в течение времени  $t = 24$  ч на воздухе при температуре  $T = 298 \pm 2$  К с последующим проведением экспериментальных исследований.

Введение различных по природе, форме и дисперсности наполнителей в эпоксидное связующее способствует физико-химическому взаимодействию, возникающему на границе раздела фаз «полимер-наполнитель», и зависит от химической активности наполнителя, удельной площади поверхности, что существенно влияет на процессы структурообразования и определяет свойства КМ в процессе эксплуатации. С учетом того, что необходимо обеспечить негорючесть материалов в качестве наполнителей для экспериментальных исследований использованы: мелкозернистый наполнитель ( $d = 5...10$  мкм) – совелитовый порошок (ТУ36-131-83) и крупнозернистые наполнители ( $d = 63$  мкм) – алюминат кальция (ГОСТ 969-91) и хлорамин Б (ТУ 9392-031-00203306-97).

Совелитовый порошок (СП) состоит из смеси солей углекислого магния ( $MgCO_3$ ) и углекислого кальция ( $CaCO_3$ ) с асбестом ( $MgSiO_3$ ). Средняя плотность порошка не превышает  $350$  кг/м<sup>3</sup>.

Алюминат кальция (АК) или глиноземистый цемент – неорганическое соединение с химической формулой  $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ . Физические свойства: молярная масса – 158,039 г/моль; температура плавления – 1605 °С; плотность – 2,98 г/см<sup>3</sup>.

Хлорамин Б (ХАБ) представляет собой кристаллогидрат натриевой соли хлорамида бензолсульфо кислоты. При нагревании разлагается с выделением хлора и хлористого водорода. Химическая формула  $\text{C}_6\text{H}_5\text{SO}_2\text{NClNa}$ . Молярная масса – 213,5 г/моль. ХАБ – белый или слегка желтоватый кристаллический порошок со слабым запахом хлора.

**Результаты исследований и их обсуждения.** Проведение экспериментальных исследований, связанных с оптимизацией состава защитных покрытий, являются, как правило, многофакторными (оптимизация свойств композитов и содержания наполнителей). Методы математической статистики позволяют адекватно оценить содержание нескольких наполнителей различной дисперсности с учетом технологических факторов, комплекса физико-механических, теплофизических свойств и показателей надежности. В работе методом математической статистики определяли оптимальное содержание в ПКМ крупнозернистых наполнителей (алюмината кальция и хлорамина Б) с дисперсностью  $d = 63$  мкм и мелкозернистых наполнителей (совелитового порошка и углекислого кальция) с дисперсностью  $d = 5 \dots 10$  мкм для формирования адгезионного и функционального слоев защитных покрытий.

На предварительном этапе экспериментально исследовали физико-механические и теплофизические свойства ПКМ, наполненных тремя наполнителями крупной и мелкой зернистости различной физической природы. Для прогнозирования свойств и оптимизации содержания каждого наполнителя в ПКМ проводили их статистическую обработку с помощью прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI [15-18].

Предварительные исследования показали, что линейная модель неадекватна к экспериментальным данным, поэтому решено использовать трехфакторный центральный композиционный план ротатбельного типа.

В процессе эксперимента было изучено влияние на физико-механические (модуль упругости при изгибе,  $E$ , ГПа; разрушающее напряжение при изгибе,  $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа; ударная вязкость,  $W$ , кДж/м<sup>2</sup>) и теплофизические (теплостойкость по Мартенсу,  $T$ , К; потери массы,  $\varepsilon_m$ , %) свойства ПКМ трех факторов: содержание алюмината кальция, хлорамина Б и совелитового порошка.

Исходные данные для статистической обработки результатов исследования ПКМ1, состоящего из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 ( $q = 100$  масс.ч.), пластифицированной трихлорэтилфосфотом ( $q = 10$  масс.ч.) и наполненной частицами алюмината кальция, хлорамина Б и совелитового порошка, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для статистической обработки результатов исследований свойств ПКМ1

Уровень варьирования	Переменные факторы		
	Содержание алюмината кальция, $q_1$ , масс.ч.	Содержание хлорамина Б, $q_2$ , масс.ч.	Содержание совелитового порошка, $q_3$ , масс.ч.
Верхний уровень	80	6	20
Нижний уровень	30	1	10

В табл. 2 приведены исходные данные и результаты реализации математической модели по результатам исследования свойств ПКМ1.

Анализ полученных с помощью прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI результатов статистической обработки экспериментальных испытаний физико-механических ( $E$ ,  $\sigma_{\text{изг}}$ ,  $W$ ) и теплофизических ( $T$ ,  $\varepsilon_m$ ) свойств ПКМ1, наполненного частицами алюмината кальция, хлорамина Б и совелитового порошка показывает следующее.

Таблица 2 – Исходные данные и результаты реализации математической модели по результатам экспериментальных исследований свойств ПКМ1

№ опыта	Факторы			Отклики				
	$q_1 (A)$	$q_2 (B)$	$q_3 (C)$	$E$	$\sigma_{изг}$	$W$	$T$	$\varepsilon_m$
	масс.ч.	масс.ч.	масс.ч.	ГПа	МПа	кДж/м <sup>2</sup>	К	%
1	60	1	20	5,4	23,52	2,41	360	32,1
2	40	4	20	5,12	20,9	2,52	363	24,4
3	80	2	20	5,8	18,9	2,91	362	27,8
4	80	6	15	6,02	24,2	2,9	364	26,9
5	80	1	10	4,6	15,5	3,72	365	33,1
6	80	2	20	5,41	18,2	3,24	362	27,7
7	70	2	10	6,1	17,6	3,04	362	21,2
8	70	6	10	5,96	18,9	2,55	357	20,9
9	30	1	10	5,13	14,1	2,45	361	19,6
10	80	4	20	6,86	21,92	2,65	363	22,1
11	50	2	20	5,6	21,45	2,81	361	27,5
12	60	2	10	7,11	20,6	2,46	362	16,6
13	60	2	15	7,9	24,9	2,72	365	21,4
14	80	4	20	6,8	21,6	2,65	363	22,2
15	30	6	15	7,19	21,3	2,76	365	21,4
16	70	6	10	6,2	18,92	2,43	357	20,9

Для определения значимости факторов использовали карты Парето (рис. 1, а-д) и графики нормального вероятностного распределения (рис. 1, е-к).

На картах Парето (рис. 1, а-д) показано, что статистически значимые эффекты имеют те факторы и их сочетания (соответствующие им колонки на картах Парето), пересекающие вертикальную линию – 95 %-ю доверительную вероятность. Также, анализ полученных графиков диагностики ошибок прогноза значений (рис. 1, е-к) показывает, что факторы и сочетания, которые существенно отклоняются от прямой нормального распределения, являются значимыми в математической модели, в отличие от других факторов, расположенных непосредственно возле прямой линии распределения. Эти результаты являются подтверждением выводов о значимости факторов математической модели, сделанных с помощью карты Парето (рис. 1, а-д).

Исключив незначимые факторы и сочетания получили поверхности отклика для физико-механических ( $E$ ,  $\sigma_{изг}$  и  $W$ ) и теплофизических ( $T$ ,  $\varepsilon_m$ ) свойств ПКМ1. Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены поверхностями отклика (рис. 2, а-д), а также контурными графиками (рис. 2, е-к).

Математические модели, рассматриваемых физико-механических и теплофизических свойств композиционного материала ПКМ1, приведены в табл. 3.

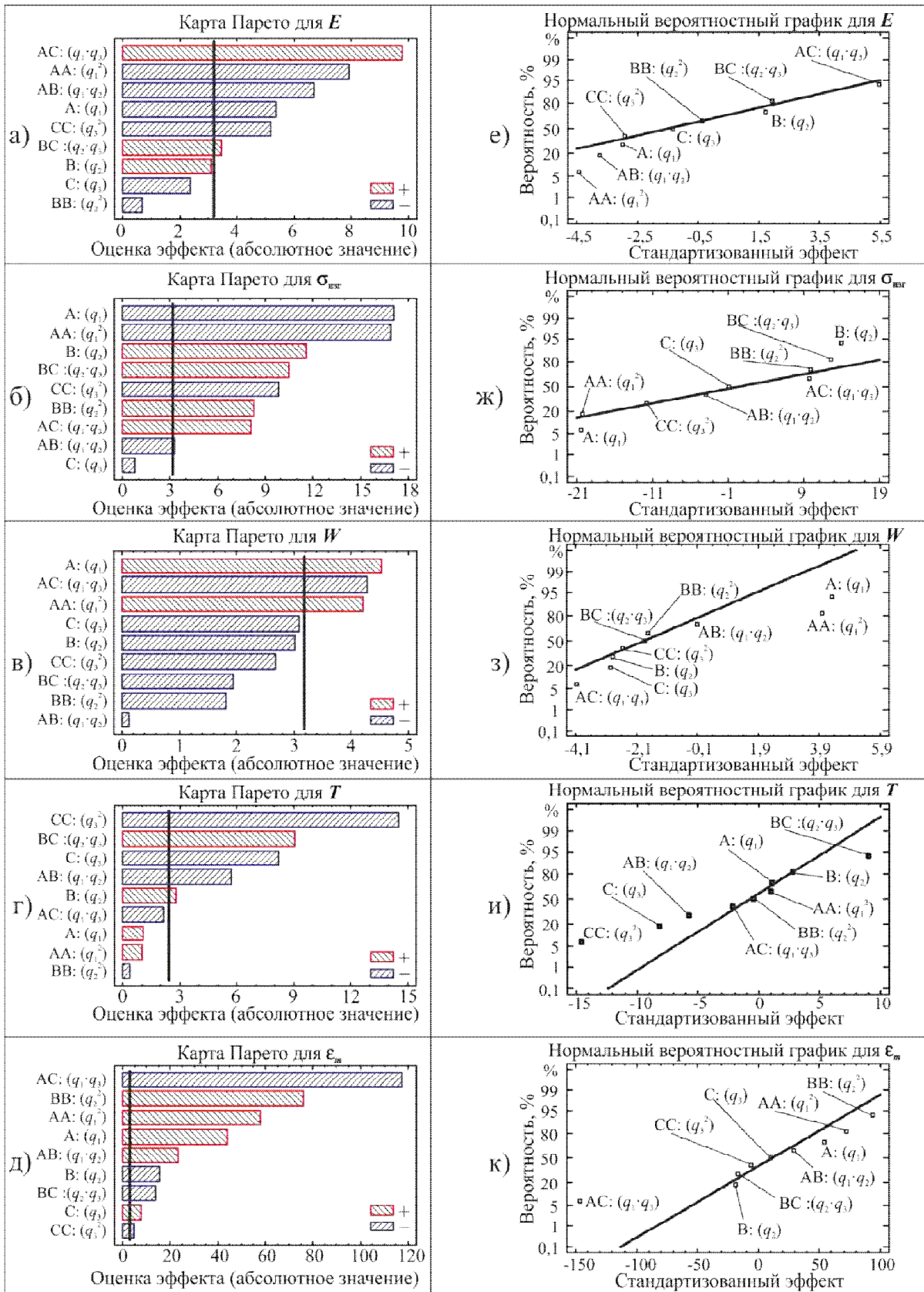


Рисунок 1 – Карты Парето (а-д) и графики диагностики отклонения ошибок прогнозирования значений выходного параметра от нормального распределения (е-к) для откликов  $E$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $W$ ,  $T$  и  $\epsilon_m$ .

Оптимальные значения показателей физико-механических и теплофизических свойств ПКМ1 при соответствующих содержаниях наполнителей (алюминат кальция –  $q_1$ , хлорамин Б –  $q_2$  и  $q_3$  – совелитовый порошок) согласно данным статистической обработки приведены в табл. 4.

Таблица 3 – Математические модели физико-механических и теплофизических свойств ПКМ1

<i>Регрессионная модель</i>	$R^2, \%$	$R^2_{adj}, \%$	<i>CAO</i>
$E = -2,22 + 0,345 \cdot q_1 - 0,021 \cdot q_3 - 0,0043 \cdot q_1^2 - 0,013 \cdot q_1 \cdot q_2 + 0,013 \cdot q_1 \cdot q_3 + 0,064 \cdot q_2 \cdot q_3 - 0,033 \cdot q_3^2$	94,2	87,6	0,183
$\sigma_{изз} = -25,37 + 1,477 \cdot q_1 + 1,75 \cdot q_3 - 0,0147 \cdot q_1^2 - 0,0117 \cdot q_1 \cdot q_2 + 0,0179 \cdot q_1 \cdot q_3 + 0,691 \cdot q_2^2 + 0,288 \cdot q_2 \cdot q_3 - 0,104 \cdot q_3^2$	99,6	99,3	0,125
$W = 2,58 - 0,065 \cdot q_1 - 0,1062 \cdot q_2 + 0,208 \cdot q_3 + 0,00112 \cdot q_1^2 - 0,00345 \cdot q_1 \cdot q_2$	80,9	71,4	0,123
$T = 337,1 + 0,0862 \cdot q_1 - 2,174 \cdot q_2 + 3,575 \cdot q_3 - 0,0188 \cdot q_1 \cdot q_2 + 0,211 \cdot q_2 \cdot q_3 - 0,136 \cdot q_3^2$	99,1	98,4	0,183
$\varepsilon_m = 2,055 - 0,285 \cdot q_1 - 9,138 \cdot q_2 + 0,0091 \cdot q_3 + 0,0091 \cdot q_1^2 + 0,0136 \cdot q_1 \cdot q_2 - 0,0457 \cdot q_1 \cdot q_3 + 1,095 \cdot q_2^2 - 0,0655 \cdot q_2 \cdot q_3 - 0,0099 \cdot q_3^2$	99,9	99,9	0,0201

Примечание:  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $R^2_{adj}$  – уточненный коэффициент детерминации; CAO – среднее абсолютное отклонение

Таблица 4 – Оптимальные значения показателей физико-механических и теплофизических свойств ПКМ1

<i>Оптимальные значения</i>		<i>Содержание наполнителей</i>		
		<i>АК, <math>q_1</math>, масс.ч.</i>	<i>ХАБ, <math>q_2</math>, масс.ч.</i>	<i>СП, <math>q_3</math>, масс.ч.</i>
$E_{opt}$ , ГПа	9,64	60	6	20
$\sigma_{изз opt}$ , МПа	36,5	60	6	20
$W_{opt}$ , кДж/м <sup>2</sup>	3,75	80	1	10
$T_{opt}$ , К	366,6	30	6	18
$\varepsilon_m opt$ , кДж/м <sup>2</sup>	33,8	80	1	18

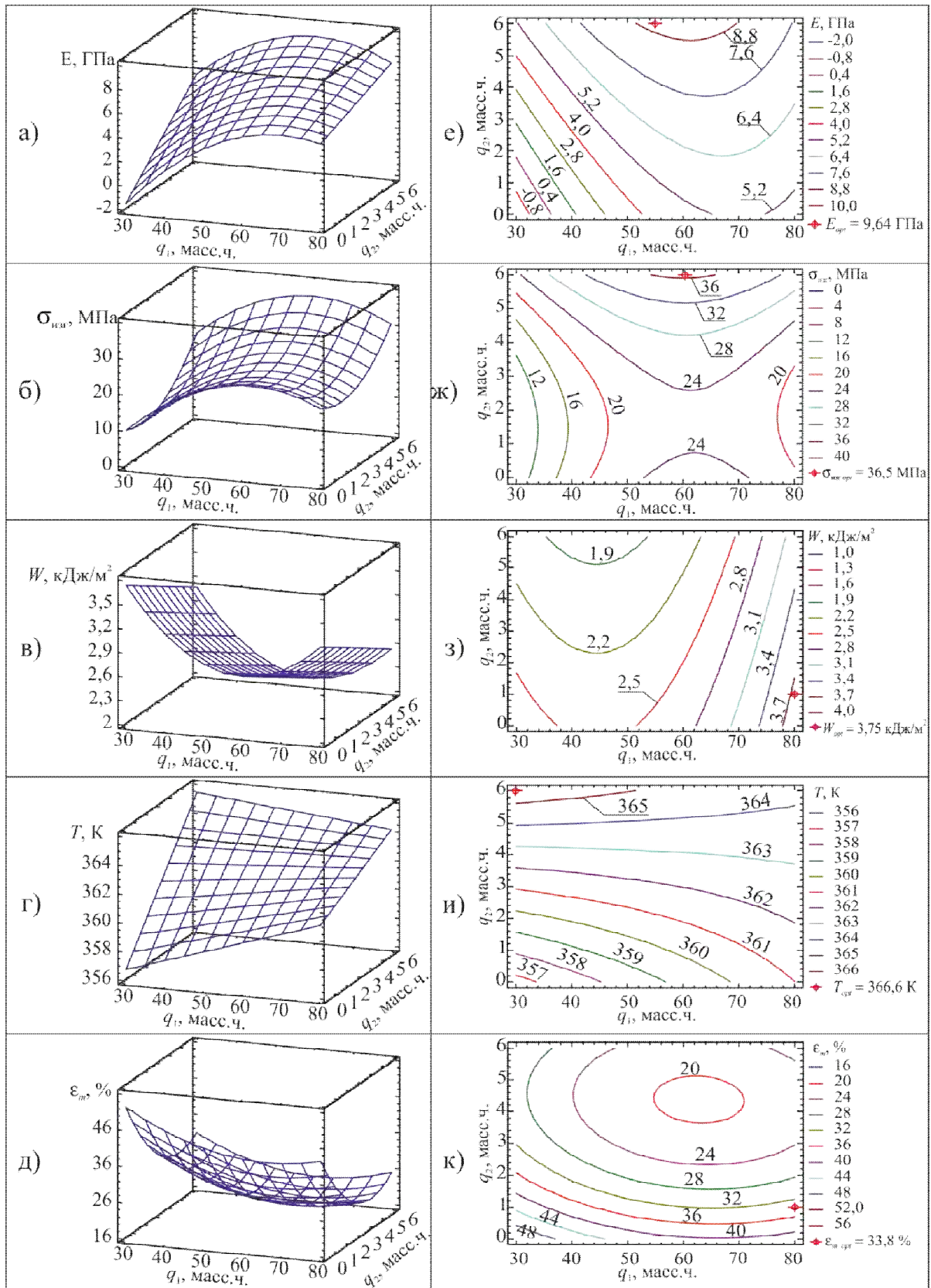


Рисунок 2 – Поверхности отклика (а-д) и контурные графики (е-к) для откликов  $E$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $W$ ,  $T$  и  $\epsilon_m$  при значениях  $q_3$ , приведенным в табл. 4.

С помощью прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI (модуль Multiple Response Optimization) провели оптимизацию полученных результатов статистической обработки для ПКМ1.

После получения полиномиальных уравнений регрессии (табл. 3), связывающих зависимые и независимые переменные, математическую модель оптимизировали

с одновременным учетом всех откликов – показателей физико-механических ( $E$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $W$ ) и теплофизических ( $T$ ,  $\varepsilon_m$ ) свойств ПКМ1 с целью определения оптимального содержания наполнителей. Функцию желательности (предпочтительного использования) оценивали во всем диапазоне рассматриваемой модели [19, 20–23]. Результаты оптимизации приведены на рис. 3 и табл. 5.

При оптимизации определяли комбинацию экспериментальных факторов по всем заданным откликам путем максимизации или минимизации каждого из них. Следует отметить, что значения откликов  $E$  (модуль упругости при изгибе, ГПа),  $\sigma_{изг}$  (предел прочности при изгибе, МПа),  $W$  (ударная вязкость, кДж/м<sup>2</sup>) и  $T$  (теплостойкость по Мартенсу, К) должны иметь максимальные значения, а  $\varepsilon_m$  (потери массы, %) – минимальное значение.

**Определение обобщенного параметра оптимизации.** В ряде случаев сведение многокритериальности к единому интегральному показателю качества осуществляется на основе функций желательности.

Под желательностью  $d$  понимали тот или иной желательный уровень параметра оптимизации. Величина  $d$  по шкала желательности, согласно [19], может меняться от 0 до 1.

Шкала выглядит следующим образом:

$d = 1,00$  – максимально возможный уровень качества;

$d = 1,00 \dots 0,80$  – допустимый и превосходный (очень высокий) уровень качества, которого также не всегда следует добиваться;

$d = 0,80 \dots 0,60$  – допустимый и хороший уровень качества (он все же выше того, которого реально добиваются);

$d = 0,60 \dots 0,37$  – допустимый и достаточный уровень качества;

$d = 0,37$  – заданный уровень качества (соответствует тому значению параметра оптимизации, которое необходимо получить);

$d = 0,37 \dots 0$  – недопустимый уровень качества;

$d = 0$  – максимально нежелательный уровень качества.

Значение  $d$  на шкале желательности можно смещать вверх или вниз в зависимости от конкретных ситуаций.

Идея использования функции желательности в качестве параметра оптимизации заключается в том, что значения каждого из параметров оптимизации ( $y_i$ ), которых в задаче может быть сколь угодно много, переводят в соответствующие желательности ( $d_i$ ), после чего формируют обобщенную функцию желательности ( $D$ ), представляющую среднее геометрическое желательностей отдельных параметров оптимизации [19]:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}, \quad (1)$$

где  $n$  – число изучаемых параметров оптимизации.

При односторонних ограничениях типа  $y \leq y_{max}$  или  $y \geq y_{min}$  функцию желательности определяют из уравнения:

$$d_i = e^{-(a_i)}, \quad a_i = e^{-(y'_i)}, \quad (2)$$

где  $y'_i$  – некоторая безразмерная величина, линейно (чаще всего) или нелинейно связанная с  $y_i$ .

Значение  $y'_i$  определяют из выражения:

$$y'_i = \frac{2y_i - y_{max} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}. \quad (3)$$



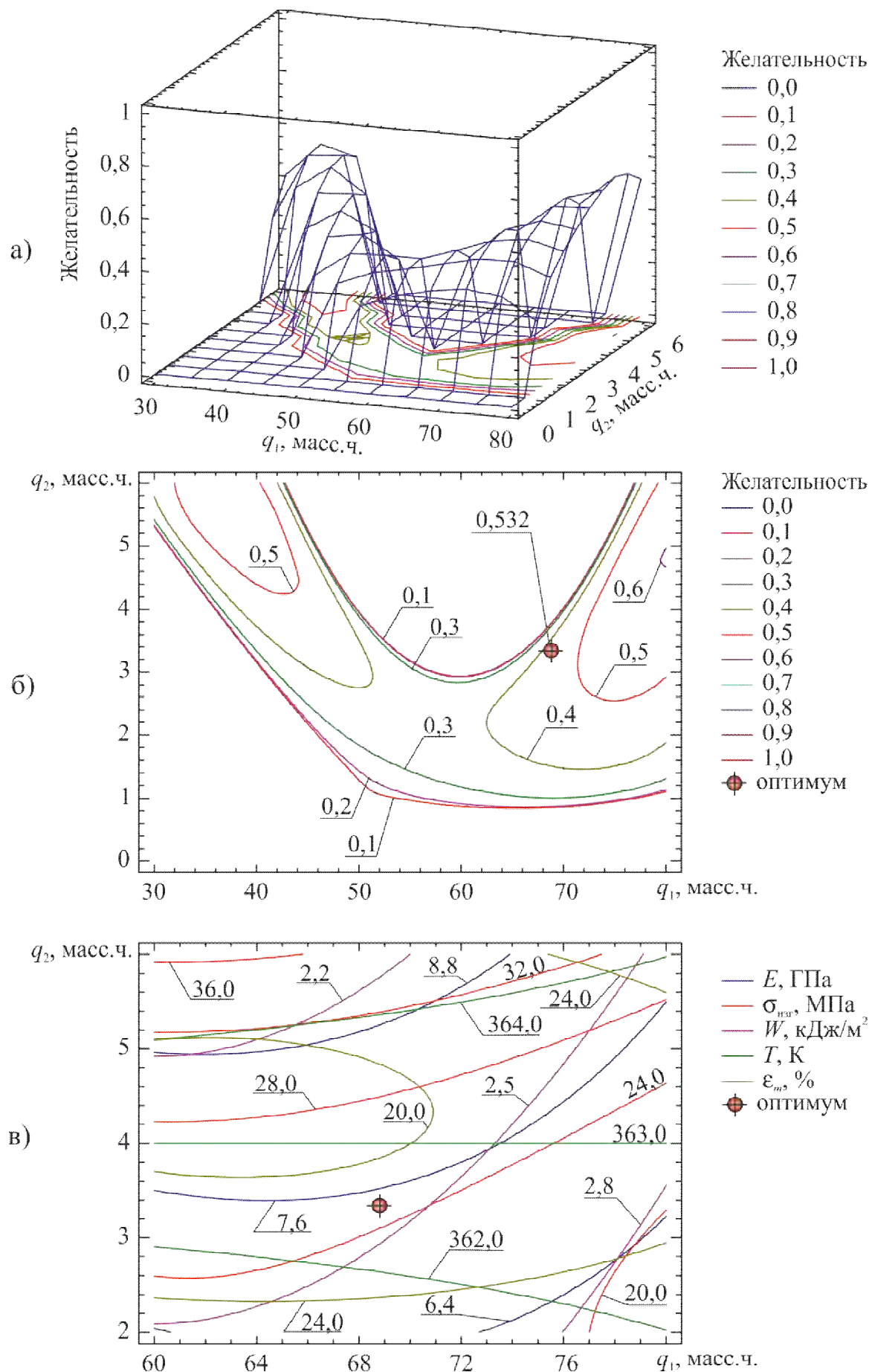


Рисунок 3 – Поверхность желательности (а), контурный график желательности (б) и контурные графики (в) для откликов  $E$ ,  $\sigma_{uz}$ ,  $W$ ,  $T$  и  $\epsilon_m$  при  $q_3 = 14,9$  масс.ч.

Таблица 5 – Результаты оптимизации для ПКМ1

№ n/n	Одновременная комбинация откликов для определения желательности					Частные желательности для соответствующего параметра оптимизации					Обобщенная желательность $D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}$
	$Y_j$					$d_i$					
	$E$	$\sigma_{изг}$	$W$	$T$	$\varepsilon_m$	$d_1(E)$	$d_2(\sigma_{изг})$	$d_3(W)$	$d_4(T)$	$d_5(\varepsilon_m)$	
ГПа	МПа	кДж/м <sup>2</sup>	К	%	–	–	–	–	–	–	
1	5,4	23,5	2,41	360,0	32,1	0,355	0,449	0,066	0,368	0,553	0,292
2	5,12	20,9	2,52	363,0	24,4	0,313	0,368	0,225	0,379	0,368	0,325
3	5,8	18,9	2,91	362,0	27,8	0,367	0,368	0,368	0,368	0,370	0,368
4	6,02	24,2	2,9	364,0	26,9	0,368	0,545	0,368	0,454	0,368	0,415
5	4,6	15,5	3,72	365,0	33,1	0,066	0,287	0,692	0,692	0,692	0,363
6	5,41	18,2	3,24	362,0	27,7	0,355	0,368	0,368	0,368	0,370	0,366
7	6,1	17,6	3,04	362,0	21,2	0,368	0,366	0,368	0,368	0,362	0,366
8	5,96	18,9	2,55	357,0	20,9	0,368	0,368	0,259	0,066	0,359	0,242
9	5,13	14,1	2,45	361,0	19,6	0,315	0,066	0,126	0,368	0,330	0,200
10	6,86	21,9	2,65	363,0	22,1	0,370	0,374	0,330	0,379	0,366	0,364
11	5,6	21,5	2,81	361,0	27,5	0,364	0,370	0,365	0,368	0,369	0,367
12	7,11	20,6	2,46	362,0	16,6	0,382	0,368	0,141	0,368	0,066	0,217
13	7,9	24,9	2,72	365,0	21,4	0,692	0,692	0,353	0,692	0,363	0,532
14	6,8	21,6	2,65	363,0	22,2	0,369	0,371	0,330	0,379	0,367	0,363
15	7,19	21,3	2,76	365,0	21,4	0,390	0,369	0,360	0,692	0,363	0,420
16	6,2	18,9	2,43	357,0	20,9	0,368	0,368	0,095	0,066	0,359	0,198

В результате проведенной оптимизации для ПКМ1 получили максимальное значение обобщенной желательности  $D_{opt} = 0,532$  (по шкале желательности соответствует допустимому и достаточному уровню качества [19]) при котором содержание наполнителей в ПКМ1:  $q_1 = 68,8$  масс.ч. – содержание алюмината кальция;  $q_2 = 3,4$  масс.ч. – содержание хлорамина Б;  $q_3 = 14,9$  масс.ч. – содержание совелитового порошка.

При указанном содержании наполнителей в ПКМ1 значения откликов составляют:  $E = 7,7$  ГПа – модуль упругости при изгибе;  $\sigma_{изг} = 23,1$  МПа – предел прочности при изгибе;  $W = 3,0$  кДж/м<sup>2</sup> – ударная вязкость;  $T = 365$  К – теплостойкость по Мартенсу;  $\varepsilon_m = 18,9$  % – потери массы.

**Выводы.** Методами статической обработки результатов экспериментального исследования полимеркомпозитного материала ПКМ1 получены уравнения регрессии для физико-механических ( $E$ ,  $\sigma_{изг}$  и  $W$ ) и теплофизических ( $T$  и  $\varepsilon_m$ ) характеристик композиционных материалов, определены оптимальные значения указанных характеристик.

С помощью прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI (модуль Multiple Response Optimization) проведена оптимизация полученных результатов статистической обработки для композиционного материала ПКМ1 по функции желательности (предпочтительного использования).

В результате проведенной оптимизации для ПКМ1 получили оптимальные концентрации наполнителей:  $q_1 = 68,8$  масс.ч. – концентрация алюмината кальция;  $q_2 = 3,3$  масс.ч. – концентрация хлорамина Б;  $q_3 = 14,9$  масс.ч. – концентрация совелитового порошка. При указанных концентрациях наполнителей в ПКМ1 значения откликов составляют:  $E = 7,7$  ГПа – модуль упругости при изгибе;  $\sigma_{изг} = 23,1$  МПа – предел прочности при изгибе;  $W = 3,0$  кДж/м<sup>2</sup> – ударная вязкость;  $T = 365$  К – теплостойкость по Мартенсу;  $\varepsilon_m = 18,9$  % – потери массы.

На основании полученных результатов планируется разработка состава новых полимерных КМ и режимов формирования полимеркомпозитных покрытий (ПКП) с улучшенными адгезионными, физико-механическими и теплофизическими свойствами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / [М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.] ; под. ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
2. Технические свойства полимерных материалов : учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский [и др.] ; под ред. В. К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2007. – 235 с.
3. Стухляк П. Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий / П. Д. Стухляк. – Тернополь : Збруч, 1994. – 177 с.
4. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2008. – 658 с.
5. Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие / В. К. Крыжановский [и др.]; под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 460 с.
6. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Профессия, 2012. – 624 с.
7. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2011. – 415 с.
8. Мийченко И. П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов : учеб. пособ. / И. П. Мийченко. – СПб. : Научные основы и технологии, 2012. – 374 с.
9. Крыжановский В. К. Технические свойства пластмасс : учеб. пособие / В. К. Крыжановский. – СПб. : Профессия, 2014. – 246 с.
10. Крыжановский В. К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс / В. К. Крыжановский. – СПб. : Науч. основы и технологии, 2009. – 203 с.
11. Технология полимерных материалов : учеб. пособие для вузов по спец. «Химическая технология высокомолекулярных соединений» / А. Ф. Николаев, В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов [и др.]; под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 533 с.
12. Букетов А. В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, І. В. Чихіра. – Тернопіль : Крок, 2011. – 201 с.
13. Прочность материалов и конструкций / под ред. В.Т. Трощенко [и др.] – К. : Академперіодика, 2006. – 1076 с.
14. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко [и др.]; под ред. В. В. Харченко. – К. : Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.
15. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах / В. Дюк. – СПб. : Питер, 1997. – 240 с.
16. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion / Р. З. Пен. – Красноярск : СибГТУ, 2014 – 293 с.
17. Григорьев С. Г. Пакет прикладных программ STATGRAPHICS на персональном компьютере / С. Г. Григорьев, А. М. Перфилов, В. В. Левандовский [и др.] – СПб. : Питер, 1992. – 104 с.
18. STATGRAPHICS® Centurion XVII User Manual [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals/\\_Statgraphics\\_Centurion\\_XVII\\_User\\_Manual.pdf?t=1456949632854](http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals/_Statgraphics_Centurion_XVII_User_Manual.pdf?t=1456949632854).
19. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский ; АН СССР, Науч. совет по комплекс. проблеме «Кибернетика». – М. : Наука, 1976. – 280 с.
20. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии : учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1985. – 327 с.

21. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В. Г. Блохин, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, М. А. Ханин; под ред. О. П. Глудкина – М. : Радио и связь, 1997. – 232 с.
22. Грачев Ю. П. Математические методы планирования эксперимента : учеб. пособие для студ. вузов / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М. : ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.
23. Рузинов Л. П. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчикова. – М. : Химия, 1980. – 280 с.

## REFERENCES

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S. et al. (2008). *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tehnologija*. SPb. : Professija.
2. Kryzhanovskij V. K. (Ed.). (2007). *Tehnicheskie svojstva polimernyh materialov*. SPb. : Professija.
3. Stuhljak P. D. (1994). *Jepoksidnye kompozity dlja zashhitnyh pokrytij*. Ternopol' : Zbruch.
4. Mihajlin Ju. A. (2008). *Special'nye polimernye kompozicionnye materialy*. SPb. : Nauchnye osnovy i tehnologii.
5. Kryzhanovskij V. K. (Ed.) (2008). *Proizvodstvo izdelij iz polimernyh materialov*. SPb. : Professija.
6. Mihajlin Ju. A. (2012). *Termoustojchivye polimery i polimernye materialy*. SPb. : Professija.
7. Mihajlin Ju. A. (2011). *Teplo-, termo- i ognestojkost' polimernyh materialov*. SPb. : Nauchnye osnovy i tehnologii.
8. Mijchenko I. P. (2012). *Tehnologija polufabrikatov polimernyh materialov*. SPb. : Nauchnye osnovy i tehnologii.
9. Kryzhanovskij V. K. (2014). *Tehnicheskie svojstva plastmass*. SPb. : Professija.
10. Kryzhanovskij V. K. (2009). *Inzhenernyj vybor i identifikacija plastmass*. SPb. : Nauch. osnovy i tehnologii.
11. Nikolaev A. F., Kryzhanovskij V. K., Burlov V. V. et al. (2008). *Tehnologija polimernyh materialov ; ucheb. posobie dlja vuzov po spec. «Himicheskaja tehnologija vysokomolekuljarnyh soedinenij»*. Kryzhanovskij V. K. (Ed.) SPb. : Professija.
12. Buketov A. V., Stuhljak P. D. & Chyhira I.V. (2011). *Vlastyvoli modifikovanyh ul'trazvukom epoksyplastiv*. Ternopil' : Krok.
13. Troshhenko V. T. (Ed.). (2006). *Prochnost' materialov i konstrukcij*. Kyiv : Akadempriodika.
14. Ljashenko B. A., Solovyh E. K., Mirnenko V. I. et al. (2010). *Optimizacija tehnologii nanesenija pokrytij po kriterijam prochnosti i iznosostojkosti*. Harchenko V.V. (Ed.). Kyiv : In-t probl. Prochnosti im. G.S. Pisarenko NAN Ukrainy.
15. Djuk V. (1997). *Obrabotka dannyh na PK v primerah*. SPB. : Piter.
16. Pen R. Z. (2014). *Planirovanie jeksperimenta v Statgraphics Centurion*. Krasnojarsk : SibGTU.
17. Grigor'ev S. G., Perfilov A. M., Levandovskij V. V. et al. (1992). *Paket prikladnyh programm STATGRAPHICS na personal'nom komp'jutere*. SPb. : Piter.
18. STATGRAPHICS® Centurion XVII User Manual *cdn2.hubspot.net*. Retrieved from [http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals\\_/Statgraphics\\_Centurion\\_XVII\\_User\\_Manual.pdf?t=1456949632854](http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/Manuals_/Statgraphics_Centurion_XVII_User_Manual.pdf?t=1456949632854)
19. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovskij Ju. V. (1976). *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij*. Moskva : Nauka.
20. Ahnazarova S. L., Kafarov V. V. (1985). *Metody optimizacii jeksperimenta v himicheskoi tehnologii : ucheb. posobie dlja him.-tehnol. spec. vuzov*. Moskva : Vysshaja shkola.
21. Blohin V. G., Gludkin O. P., Gurov A. I., Hanin M. A. (1997). *Sovremennyj jeksperiment: podgotovka, provedenie, analiz rezul'tatov*. Gludkin O. P. (Ed.) Moskva : Radio i

svjaz'.

22. Grachev Ju. P., Plaksin Ju. M. (2005). *Matematicheskie metody planirovanija jeksperimenta : uceb. posobie dlja stud. Vuzov*. M. : DeLiPrint.

23. Ruzinov L. P., Slobodchikova R. I. (1980). *Planirovanie jeksperimenta v himii i himicheskoj tehnologii*. M. : Himija.

**Акімов О. В., Михайлик В. Д., Бень А. П., Івченко Т. І., Гнатов А. В.** ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ТРАНСПОРТІ

*Представлена оптимізація результатів експериментальних досліджень складу захисних покриттів, призначених для відновлення та ремонту елементів транспортних енергетичних установок, що веде до підвищення ефективності їх експлуатації. У результаті проведеної оптимізації набуті оптимальних значень концентрації наповнювачів у трикомпонентних бідисперсних захисних полімеркомпозитних покриттях із полішеними адгезійними, фізико-механичними і теплофізичними властивостями.*

**Ключові слова:** оптимізація, захисні покриття, полімеркомпозит.

**Akimov A. V., Mikhailik V. D., Ben A. P., Ivchenko T. I., Gnatov A. V.** OPTIMIZATION OF PROTECTIVE COATINGS FOR THE REPAIR AND IMPROVEMENT OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF THE POWER PLANTS IN THE TRANSPORT

*Submitted by optimizing the results of experimental studies of the composition of protective coatings designed to recover and repair of transport elements of power plants, which leads to increased efficiency of their operation. As a result of optimization of the optimal values obtained filler concentrations in the three-bidisperse polymercomposite protective coatings with improved adhesion, mechanical and thermal properties.*

**Keywords:** optimization, protective coatings, polymercomposite.

© Акімов О. В., Михайлик В. Д., Бень А. П., Івченко Т. І., Гнатов А. В.

Статтю прийнято  
до редакції 06.04.16