

УДК 691.335:666.952

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КРИТЕРИЙ ВОДОСТОЙКОСТИ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В.Я. КЕРШ, канд. техн. наук, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства, **А.В. ФОЩ**, канд. техн. наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, **А.В. КОЛЕСНИКОВ**, канд. техн. наук, старший преподаватель, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина

Ключевые слова: гипс, вяжущее, пуццоланы, водостойкость, коэффициент размягчения, статистические модели, оптимизация

Keywords: gypsum, binder, pozzolans, water resistance, softening factor, statistical models, optimization

В статье предложен новый критерий водостойкости материалов, содержащих гипс, – индекс водостойкости. Рассматриваются преимущества этого критерия по сравнению с коэффициентом размягчения – корректный учет прочности материала в водонасыщенном состоянии, статистическая детерминированность, широкий диапазон изменений. Индекс водостойкости успешно использован в решении задачи оптимизации состава материала.



Керш Владимир Яковлевич,
160 научных публикаций,
1 монография



Фощ Алена Викторовна,
35 научных публикаций



Колесников Андрей Валерьевич,
25 научных публикаций

Важной задачей строительного материаловедения является создание материалов, обеспечивающих существенную экономию энергии как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации. К таковым относятся гипсовые и гипсосодержащие композиты. Применение гипсовых вяжущих в ряде случаев ограничивается их недостаточной водостойкостью (значительным снижением прочности изделий при их увлажнении) [1]. Степень водостойкости материалов обычно оценивается коэффициентом размягчения K_p , равным отношению прочностей при сжатии в водонасыщенном и сухом состоянии [2]: $K_p = R_{c(в)} / R_{c(с)} = R_{c(в)} / R_{c(сух)}$. Коэффициент размягчения изделий из чистого гипса $K_p = 0,3-0,5$. Прочность гипсовых композитов с рыхлыми наполнителями, например перлитом, резко уменьшается при контакте с влагой – вплоть

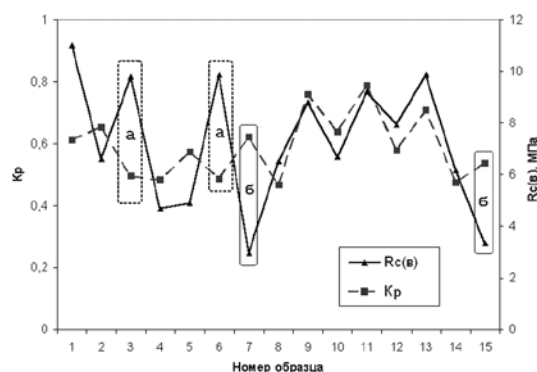


Рис. 1. Коэффициент размягчения K_p (пунктир) и прочность при сжатии водонасыщенных образцов $R_{c(в)}$. Рамками выделены области несогласованного изменения этих величин: а – недооценка, б – переоценка водостойкости

до самопроизвольного разрушения в водонасыщенном состоянии.

Повышение водостойкости гипсовых композитов актуально для штукатурных и стеновых материалов, применяемых, в частности, в помещениях со значительной влажностью. При разработке оптимальных составов с улучшенными теплозащитными свойствами возникает ряд особенностей, которые рассматриваются в данной работе.

Эффективной водостойкостью обладают гипсоцементно-пуццолановые (ГЦПВ), гипсо-

Таблица 1. Регрессионные модели: водопоглощения W , прочности при сжатии в сухом $R_{c(сух)}$ и водонасыщенном $R_{c(вл)}$ состояниях, теплопроводности λ

$W =$ +26,84 -26,85* Вяж/тв +125,35* Перлит/зола -8,78* ГКЖ -195,62* Вяж/тв* Перлит/зола +14,73* Вяж/тв* ГКЖ -19,08* Перлит/зола* ГКЖ +295,93* Перлит/зола ²	$R_{c(сух)} =$ -5,83 +44,34* Вяж/тв -65,80* Перлит/зола	$R_{c(вл)} =$ +3,59 -5,65* Вяж/тв -31,98* Перлит/зола +31,32* Вяж/тв ²	$\lambda =$ +0,50 0,14* Вяж/тв -2,07* Перлит/зола -0,36* ГКЖ +1,93* Вяж/тв* Перлит/зола +0,17* ГКЖ ²
R^2 0,9778 Adj R^2 0,9557 Pred R^2 0,7587	R^2 0,9316 Adj R^2 0,9201 Pred R^2 0,8924	R^2 0,9041 Adj R^2 0,8780 Pred R^2 0,8220	R^2 0,9151 Adj R^2 0,8679 Pred R^2 0,8325

шлакоцементно-пуццолановые (ГШЦПВ) вяжущие и композиты на их основе [3, 4, 5]. Получение такого композита, в котором часть пуццолановой добавки заменена на менее активный низкотеплопроводный наполнитель, а также дополнительное повышение водостойкости материала связаны с необходимостью подбора его рационального состава.

На основании предварительных результатов [6] сформирован трехфакторный план эксперимента типа В-3 для исследований свойств зологипсоцементперлитобетона (далее перлитобетон) средней плотностью 1500 кг/м³. В качестве независимых факторов выбраны: отношение суммарной массы гипса и цемента к массе твердых компонентов (далее – Вяж/тв), отношение масс пассивных компонентов – перлит/зола, количество гидрофобизатора ГКЖ-11К (% от массы вяжущего) – фактор ГКЖ. Ряд других факторов (например, гипсоцементное отношение, $m_{\text{цем}}/m_{\text{гипс}}=0,64$), которые также влияют на формирование структуры и свойств перлитобетона, были условно зафиксированы.

Изготовлены 15 опытных образцов и определены их свойства, в частности водопоглощение $W(10,3-26,2\%)$, прочность при сжатии в сухом $R_c(\text{сух})$ (4,8-19,8 МПа) и водонасыщенном $R_c(\text{вл})$ (3,4-9,9 МПа) состояниях, теплопроводность λ (0,23-0,45 Вт/(м·К)), а также коэффициент размягчения K_p (0,47-0,76). Регрессионные модели характеристик, существенных при эксплуатации рассматриваемого гипсо содержащего материала, приведены в табл. 1.

Анализ экспериментальных данных показал недостаточную объективность оценки водостойкости композита по коэффициенту размягчения K_p . При использовании

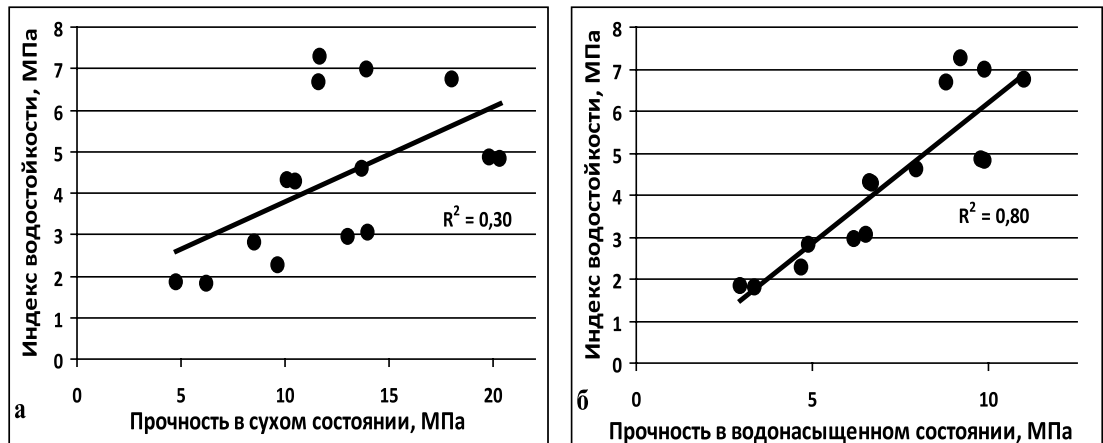


Рис. 3. Связь индекса водостойкости с прочностью образцов в сухом (а) и водонасыщенном (б) состояниях

Таблица 2. Регрессионные модели коэффициента размягчения K_p и индекса водостойкости K_v

$K_p =$ +0,54 +0,60 * Перлит/зола	$K_v =$ +7,64 -27,59 * Вяж/тв -15,79 * Перлит/зола +42,95 * Вяж/тв ²
R^2 0,2397	R^2 0,7104
Adj R^2 0,1812	Adj R^2 0,6314
Pred R^2 0,0233	Pred R^2 0,5691
F-value 4,10	F-value 8,99
p-value 0,0640	p-value 0,0027
not significant	significant

K_p в качестве критерия водостойкости нивелируется роль более важной в реальных эксплуатационных условиях характеристики $R_c(\text{вл})$. Из приведенных экспериментальных зависимостей (рис. 1) видно, что для образцов 3 и 6 водостойкость согласно значениям K_p недооценивается – прочности $R_c(\text{вл})$ здесь достаточно велики. С другой стороны, противоположная тенденция, ведущая к переоценке водостойкости, характерна для образцов 7 и 15. Здесь K_p велико, но прочность $R_c(\text{вл})$ мала, материал при увлажнении в эксплуатационных условиях подвержен быстрому разрушению.

Анализ зависимости коэффициента размягчения от прочности образцов в сухом и водонасыщенном состоянии (рис. 2) показал отсутствие взаимной статистической связи.

Для оценки водостойкости материала предлагается другая характеристика – индекс водостойкости K_v , в которой «усилено» значение прочности в водонасыщенном состоянии $K_v = R_c(\text{вл})^2 / R_c(\text{сух})$. Корреляционная взаимосвязь индекса водостойкости и

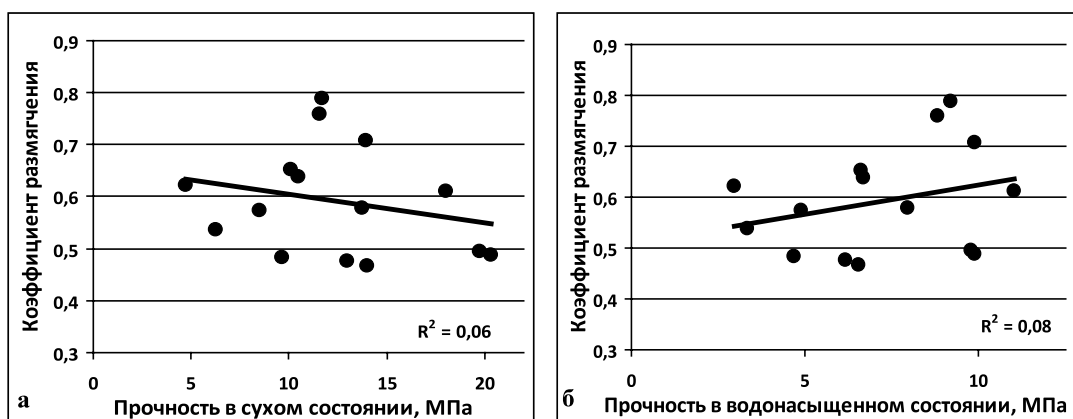


Рис. 2. Коэффициент размягчения и прочность образцов в сухом (а) и водонасыщенном (б) состояниях

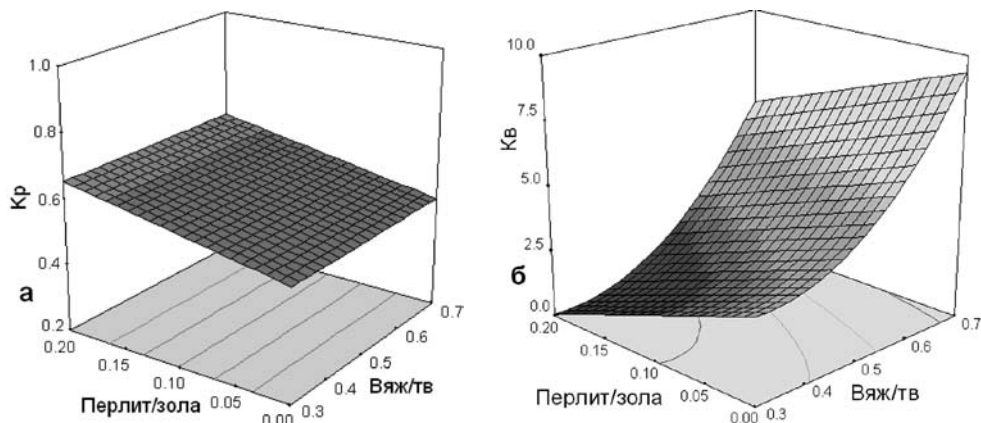


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента размягчения K_p (а) и индекса водостойкости K_w (б) от значимых факторов

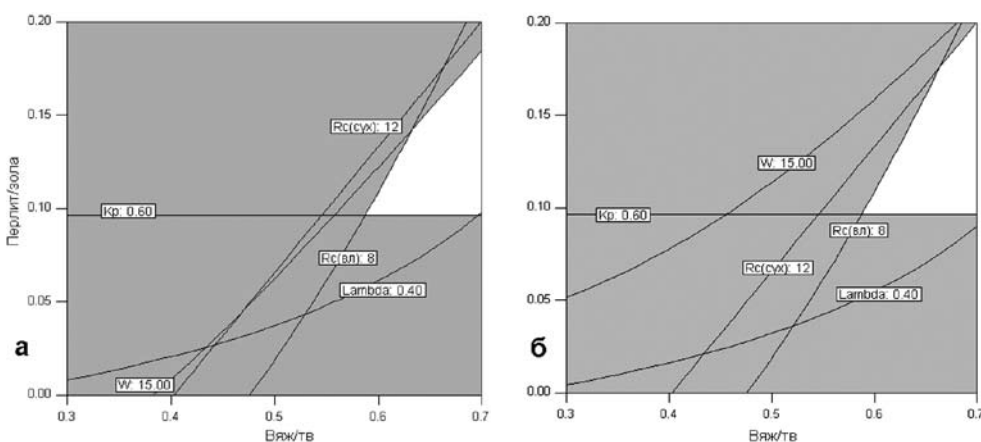


Рис. 5. Область допустимых составов исследуемого материала (отмечена светлым): а – ГКЖ=0,5%, б – ГКЖ=1,5%

прочностных показателей материала существенно выше по сравнению с традиционным коэффициентом размягчения (рис. 3).

Результаты регрессионного моделирования коэффициента размягчения K_p и индекса водостойкости K_w от факторов эксперимента приведены в табл. 2. О качестве соответствующих моделей можно судить по приведенным значениям их параметров – коэффициента детерминации R^2 , его скорректированного $Adj R^2$ и модельного значения $Pred R^2$, критерия Фишера F и p -значения.

Зависимость K_p от факторов эксперимента является незначимой, коэффициенты детерминации низки. В то же время модель индекса водостойкости K_w является значимой, достаточно велик и коэффициент детерминации. Графическое отображение соответствующих моделей приведено на рис. 4.

Коэффициент размягчения K_p , согласно рис. 4а и модели в табл. 2, возрастает с увеличением доли мелкодиспер-

Таблица 3. Нормативные требования к исследуемому материалу

Эксплуатационные свойства	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение
W, %	15	–
Rc(сух), МПа	–	12
Rc(вл), МПа	–	8
λ , Вт/м·К	0,4	–
K_p	–	0,6

сного гигроскопичного наполнителя – перлита, а также не зависит от доли вяжущего, что является физически необоснованным.

Индекс водостойкости K_w статистически более достоверен и физически более обоснован – возрастает с увеличением доли вяжущего и уменьшением содержания перлита, рис. 4б. Дополнительные преимущества предлагаемого критерия состоят в следующем:

1) K_w статистически детерминирован. Более высоким значениям прочности, как правило, соответствует более высокий индекс водостойкости, что позволяет использовать его в качестве критерия оптимальности в задачах материаловедения;

2) K_w имеет физический смысл приведенной прочности – $K_w = K_p \cdot Rc(вл)$, МПа;

3) K_w изменяется в большем диапазоне значений ($K_w = 1,80 - 7,27$ для рассматриваемого материала), что повышает точность оценки водостойкости по сравнению с коэффициентом размягчения, варьирующим в пределах всего нескольких десятых ($K_p = 0,48 - 0,79$, рис. 1).

Перечисленные преимущества позволяют использовать K_w в качестве основного критерия оптимизации эксплуатационных свойств материала наряду с водопоглощением W , %, прочностью при сжатии в сухом $Rc(сух)$ и водонасыщенном $Rc(вл)$ состояниях, теплопроводностью λ . Исходя из предполагаемых условий эксплуатации, ми-

нимальным значением W является 10,19%, а максимальным – 15%. Максимальными значениями $Rc(сух)$ и $Rc(вл)$ являются 12 МПа и 8 МПа, а минимальными – 20,32 МПа и 11,02 МПа. Коэффициент размягчения K_p должен находиться в диапазоне от 0,6 до 0,789. Минимальным значением λ является 0,4 Вт/м·К, а максимальным – 0,227 Вт/м·К. Максимальным значением K_w является 7,26, а минимальным – 1,8.

Таблица 4. Параметры задачи многокритериальной оптимизации материала

Свойство	Цель оптимизации	Нижний предел	Верхний предел	Степень важности
W	minimize	10,19	15	3
Rc(сух)	maximize	12	20,32	3
Rc(вл)	maximize	8	11,02	4
K_p	in range	0,6	0,789	–
λ	minimize	0,227	0,4	4
K_w	maximize	1,8	7,26	5

Таблица 5. Оптимальные составы и их характеристики

№	Состав			Свойства					
	Вяз/тв	Перлит/зола	ГКЖ	W	Rc(сух)	Rc(вл)	λ	K_p	K_w
1	0,72	0,14	1,02	10,19	17,01	11,34	0,33	0,63	7,85
2	0,72	0,13	1,02	10,14	17,08	11,38	0,33	0,62	7,86
3	0,71	0,13	1,02	10,19	17,06	11,28	0,33	0,62	7,75

нимальное значение Кр назначено на уровне 0,6. Оптимизация состава материала проводилась геометрически, с учетом нормативных ограничений (рис. 5), а также методом функции желательности [8]. Нормативные ограничения, учитываемые при геометрической оптимизации, приведены в табл. 3.

Области допустимых составов при граничных значениях фактора ГКЖ (0,5% и 1,5%), отражены на оверлейных диаграммах на рис. 5.

Численная оптимизация методом функции желательности позволяет выделить в рассматриваемых допустимых областях составы с оптимальным набором эксплуатационных характеристик. Одна из возможных постановок задач оптимизации рассмотрена в табл. 4.

В результате была получена оптимальная рецептура составов; три наилучших варианта отражены в табл. 5.

Применение классического коэффициента размягчения для оптимизации материала приводит к некорректным выводам: неоптимальным составам и нестабильным свойствам материала при эксплуатации в условиях повышенной влажности (бытовое затопление, в результате повреждения ограждающих конструкций, в частности кровли, окон, при гашении пожаров водой и др.).

Решение задач оптимизации свойств материала с использованием индекса водостойкости в качестве критерия позволяет получать гипсосодержащие составы с улучшенными эксплуатационными характеристиками и повышенной водостойкостью.

Библиографический список

1. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // Химия современных строительных материалов, вып. №4, 2003, с. 18-25.
2. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / Под ред. А.В. Ферронской. – М.: АСВ, 2004, – 488 с.
3. Ферронская А.В. Развитие теории и практики в области гипсовых вяжущих веществ // Сб. «Развитие теории и технологий в области силикатных и гипсовых материалов», ч. 1. – М.: МГСУ, 2000, с. 47-56.
4. Волженский А.В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия / А.В. Волженский, В.И. Стамбулко, А.В. Ферронская. – М.: Стройиздат, 1971, – 318 с.
5. Коровяков В.Ф. Перспективы применения водостойких гипсовых вяжущих в современном строительстве // Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий: Материалы Всероссийского семинара. – М.: 2002, с. 51-56.
6. Фош А.В. Оцінка якості гідробізуючих добавок та їх вплив на водостійкість гіпсу / А.В. Фош, В.Я. Керш, А.В. Колесников // Зб. праць УкрДУЗТ, – Харків, вип. №157, 2015 р., с. 49-53.
7. Вознесенский В.А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. – К.: Будивельник, 1989, с. 55-97.
8. Керш В.Я. Оптимизация утепляющей штукатурной композиции методами функции желательности / В.Я. Керш, А.В. Колесников, Н.В. Хлызов // Моделирование и оптимизация композиционных строительных материалов: международный научно-технический семинар: материалы семинара / ОГАСА. – Одесса, 2016, с. 52-56.

ВЫСТАВКА КРЫМ. СТРОЙИНДУСТРИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ОСЕНЬ-2017

9-11 ноября

г. Ялта, ул. Дражинского, 50
Гостиничный комплекс
«ЯЛТА-ИНТУРИСТ»

Разделы экспозиции:

- Современные строительные материалы и технологии.
- Краски, лаки.
- Строительные машины и механизмы.
- Окна, двери, кровли, фасады.
- Металлические конструкции.
- Сантехника.
- Экология. Системы очистки воды.
- Системы отопления, вентиляции и кондиционирования.
- Электротехническое и осветительное оборудование.
- Кабельно-проводниковая продукция.
- Энергосбережение и использование нетрадиционных экологически чистых источников энергии.
- Системы автоматизации. Программное обеспечение предприятий строительной, энергетической, электротехнической отраслей промышленности.

ФОРУМ КРЫМСКИЕ
ВЫСТАВКИ

Оргкомитет: Республика Крым, г. Симферополь, ул. Горького, 8, оф. 27,
моб.: +7 978 78 178 83, т./ф.: +7(3652) 54-60-66, +7(3652) 54-67-46,
E-mail: marketing@expoforum.biz, http://expoforum.biz/

