

Керш В. Я., Колесников А. В., Фощ А. В., Щербина В. С.

## ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДОСТОЙКОСТИ ГИПСОВЫХ КОМПОЗИТОВ

*В статье рассматривается оценка водостойкости теплозвукоизолирующих композиционных материалов на основе гипса с помощью нового параметра – индекса водостойкости. Рассматриваются перспективы применения композиционных материалов на основе гипса для внутренних стен, перегородок и полов зданий, обеспечивающих теплоизоляцию и акустический комфорт. Гипсовые композиты являются экологически чистыми, выгодными для использования с экологической и технологических позиций, однако их применение требует существенного увеличения их водостойкости. С этой целью рассматривается возможность совершенствования описания водостойкости гипсовых композитов. Показано, что водостойкость может быть описана несколькими способами. Наряду с традиционным коэффициентом размягчения предлагается использовать величину, более адекватно оценивающую водостойкость композитов и ее ключевую характеристику – прочность материала в водонасыщенном состоянии. Предлагается использовать разработанную характеристику для классификации и оценки возможности применения материалов, а также при оптимизации их составов, в качестве частного критерия. Рассмотрена оптимизация композита на основе гипсоцементно-золевого матричного материала и смеси трех видов наполнителей, служащих для улучшения тепло- и звукоизолирующих свойств. Построены экспериментально-статистические модели эксплуатационных характеристик, в том числе и коэффициента размягчения, и индекса водостойкости. Рассматривается геометрическая оптимизация состава композита, позволяющая выделить область допустимых составов, а также результат численной оптимизации, позволяющий выбрать в этой области состав с оптимальным набором эксплуатационных характеристик. Применение индекса водостойкости в задачах оптимизации теплозвукоизолирующих составов позволяет, в частности, осуществлять направленный выбор оптимальных составов из допустимой области.*

**Ключевые слова:** индекс водостойкости, гипсовые композиты, коэффициент размягчения, оптимизация, экспериментально-статистические модели

Современная строительная отрасль нуждается в материалах с улучшенными эксплуатационными, технологическими, и экологическими качествами. Основными проблемами в многоэтажных зданиях являются теплозащита и звукоизоляция. Если для наружных ограждающих конструкций разработаны фасадные системы, включая светопрозрачные, обеспечивающие требуемый уровень теплотехнических и акустических свойств, то для внутренних стен, перегородок и полов эти проблемы остаются нерешенными. Широко применяемые при возведении перегородок блоки из ячеистого бетона имеют хорошие теплоизолирующие характеристики, однако не обеспечивают акустический комфорт. Еще более острой является проблема устройства теплозвукоизолирующих полов.

Перспективными для повышения теплового и акустического комфорта помещений являются композиционные материалы на основе гипса – экологически чистые, технологичные и экономически выгодные [1]. Важным технологическим преимуществом гипсовых и гипсосодержащих материалов является их быстрое твердение [2], что повышает производительность работ. Составы, у которых согласованы текучесть и сроки схватывания, могут использоваться при изготовлении оснований наливных полов, а также перегородок литевым способом.

Затвердевший строительный гипс, благодаря наличию большого количества микропор, сообщающихся капиллярами, обладает наилучшим сочетанием теплозащитных и звукоизолирующих качеств. Однако сквозная микропористость оказывает отрицательное влияние на водостойкость гипса. Применение материалов на основе гипса ограничивается значительным снижением прочности при увлажнении изделий из них, особенно с рыхлыми заполнителями (например, перлит, опилки и т.п.), вплоть до самопроизвольного разрушения в водонасыщенном состоянии. Очевидно, что разработка теплозвукоизолирующих составов для указанных целей должна вестись с учетом требований по водостойкости [3].

Повысить теплозвукоизоляционные характеристики гипсовых материалов можно, добавляя в смесь нетрадиционные заполнители, обладающие низкой плотностью, малой теплопроводностью и звукопроницаемостью, а также низким водопоглощением, – пенополистирол, пробковую крошку и гранулированное пеностекло. «Слабым звеном», с точки зрения водостойкости, в данном случае является матричный материал – гипсовый камень. Можно выделить два основных направления увеличения водостойкости гипсовых композитных материалов:

1. Введение в смесь цемента с добавкой пуццолановых компонентов. Таким способом получают гипсоцементно-пуццолановые и гипсошлакоцементно-пуццолановые вяжущие и композиты на их основе [4].
2. Внутренняя и поверхностная гидрофобизация с помощью кремнеорганических соединений [5].

Таким образом, задача создания и оптимизации теплозвукоизолирующих составов с повышенной водостойкостью является многофакторной и многокритериальной. Рассмотрим в данной работе вопросы, связанные с повышением водостойкости гипсовых композитов.

Оценка водостойкости материалов может быть осуществлена, вообще говоря, различными способами, на основе его базовых прочностных характеристик – прочности при сжатии сухого материала  $R_c$ , МПа, и прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии  $R_v$ , МПа.

В настоящее время водостойкость материалов обычно оценивается коэффициентом размягчения  $K_p$ , равным отношению прочностей при сжатии в водонасыщенном и сухом состоянии:  $K_p = R_v/R_c$ . Коэффициент размягчения, например, изделий из чистого гипса  $K_p = 0,3 - 0,5$ , что указывает на его низкую водостойкость. Водостойкими считаются материалы с  $K_p \geq 0,8$ , получение таких композитов на основе гипса представляет одну из задач строительного материаловедения.

Однако, как показывает опыт, коэффициент размягчения, недостаточно корректно оценивает водостойкость многокомпонентных материалов на гипсовых вяжущих (и на цементных также). Высокие значения  $K_p$  могут сопровождаться недопустимо низкими значениями  $R_c$  и, соответственно, невысокой  $R_v$ , что затрудняет интерпретацию  $K_p$  как меру качества и возможности использования материала в условиях увлажнения.

Более полезным представляется другой критерий – индекс водостойкости  $K_v$ , коэффициент, в котором «усилено» значение прочности во влажном состоянии, как характеристики, определяющей возможность применения материала при увлажнении,  $K_v = (R_v)^2/R_c$ . Предлагаемый индекс водостойкости позволяет более объективно и точно оценивать степень водостойкости материалов и сравнивать их между собой по этому признаку, так как он:

1) 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) имеет физический смысл приведенной прочности,  $K_v = K_p \cdot R_v$

3) изменяется в большем диапазоне значений по сравнению с коэффициентом размягчения, который варьирует в пределах нескольких десятых, что повышает точность оценки водостойкости.

Наряду с использованием коэффициента размягчения и индекса водостойкости для классификации и оценки применимости композитов, эти величины могут выступать в качестве зависимых переменных в экспериментально-статистических моделях, а также в качестве частных критериев в задачах оптимизации композитов. В этом случае преимущества индекса водостойкости  $K_v$  особенно ценны.

Рассмотрим применение индекса водостойкости в экспериментально-статистических моделях свойств теплозвукоизолирующего гипсосодежащего композита. В качестве вяжущего выбран золагипсоцементный состав, перспективный для обеспечения высокой водостойкости. Выполнен подбор заполнителей с целью повышения звукоизолирующих и энергосберегающих качеств композита. Использовались смесь водостойких теплоизолирующих заполнителей – пенополистирола, гранулированного пеностекла и пробковой крошки. Особенностью двух последних является способность гасить звуковые колебания. Предполагается, что сочетание этих заполнителей в определенной пропорции способно обеспечить необходимый комплекс эксплуатационных свойств.

В результате учета литературных данных [6-8] и предварительных экспериментов выбраны следующие независимые факторы: доля заполнителей в их смеси: пенополистирола («Полистирол»)– $X_1$ , пробковой крошки («Пробка»)– $X_2$ , гранулированного пеностекла («Пеностекло»)– $X_3$ , а также зола-цементное отношение («Зола»)– $X_4$ . Их средние значения и соответствующие уровни варьирования (с учетом симметрии по заполнителям), а также структура разработанного плана эксперимента вида «смесь-смесь» с фиксированным суммарным содержанием заполнителей (треугольник) и изменяющимся зола-цементным отношением (отрезок), схематически отображены на рис. 1.

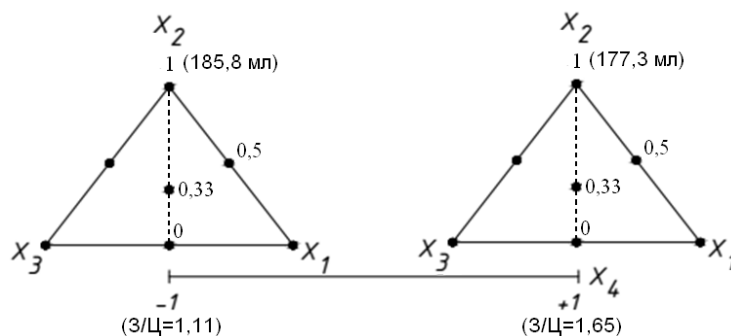


Рис.1. План эксперимента смесь-смесь. Указаны уровни варьирования для  $X_2$ , для  $X_1$  и  $X_3$  они симметричны

На основе изученных свойств образцов материалов построены экспериментально-статистические модели зависимостей соответствующих свойств от значений факторов. Эти зависимости представляют собой линейные по  $X_4$  и квадратичные по  $X_1, X_2$  и  $X_3$  выражения, зависящие от кодированных значений соответствующих факторов. Модели двух характеристик водостойкости–коэффициента размягчения  $Kp$  и индекса водостойкости  $Kв$  приведены на рис.2, а их графическое отображение – на рис.3.

Коэффициент размягчения		Индекс водостойкости	
$Kp =$ +0.680 * Полистирол +0.611 * Пробка +0.659 * Пеностекло -0.359 * Полистирол * Пробка -0.0964 * Полистирол * Зола -0.244 * Пробка * Пеностекло +0.0201 * Пробка * Зола -0.118 * Пеностекло * Зола -0.297 * Пробка * Пеностекло * Зола		$Kв =$ +2.572 * Полистирол +2.645 * Пробка +4.200 * Пеностекло -3.070 * Полистирол * Пробка -0.388 * Полистирол * Зола -2.857 * Пробка * Пеностекло -0.989 * Пеностекло * Зола	
R-Squared	0.96	R-Squared	0.93
Adj R-Squared	0.91	Adj R-Squared	0.87
Pred R-Squared	0.67	Pred R-Squared	0.77

Рис.2. Экспериментально-статистические модели коэффициента размягчения и индекса водостойкости

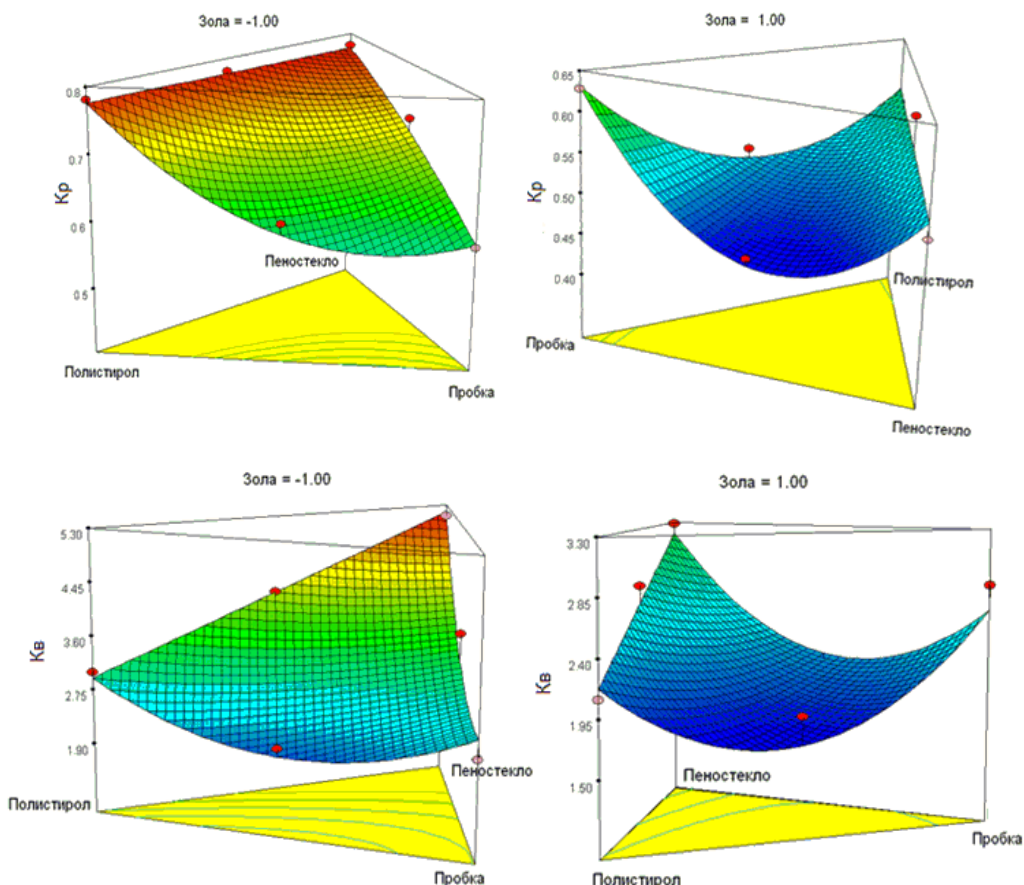


Рис.3 Отображение моделей коэффициента размягчения  $Kp$  и индекса водостойкости  $Kв$ .

Коэффициент размягчения принимает наибольшее значение при минимальной концентрации золы ( $x_4=-1$ ). Максимальному  $Kp$  соответствует композит без пробковой компоненты, при этом влияние полистирола и пеностекла почти одинаково – наблюдается линия составов с одинаковым уровнем коэффициента размягчения (изолиния). Наибольшее значение индекса водостойкости  $Kв$  возникает при минимальном содержании золы ( $X_4 = -1$ ) и максимальном содержании пеностекла. Возможным объяснением положительного

влияния пеностекла на водостойкость композита является замкнутая пористость пеностекла и, практически, «нулевое» его водопоглощение.

Таким образом, в рассматриваемой задаче моделирования индекс водостойкости характеризуется повышенной дискриминационной способностью – в случае диаграмм для  $K_v$ , в отличие от  $K_p$ , отсутствует изолиния водостойкости.

Регрессионные экспериментально-статистические модели эксплуатационных характеристик, в том числе и приведенные на рис.2, использованы при многокритериальной оптимизации композиционного материала. Критерии и цели оптимизации приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Критерии и цели оптимизации.

Свойства	Цели	Нижний	Верхний	Степень
$\rho$	минимизировать	900	1100	2
$R_c$	максимизировать	5	12,1	4
$R_v$	в диапазоне	0,5	1,06	-
$\lambda$	минимизировать	0,2	0,25	4
Air noise	минимизировать	0,025	0,05	3
Blow noise	минимизировать	28	30	4
$K_p$	в диапазоне	0,6	1	-
$K_v$	максимизировать	3	5	4

Геометрическая оптимизация композита, позволяющая выделить области допустимых составов, удовлетворяющих одновременно всем приведенным критериям, отображена на оверлейном графике (рис. 4).

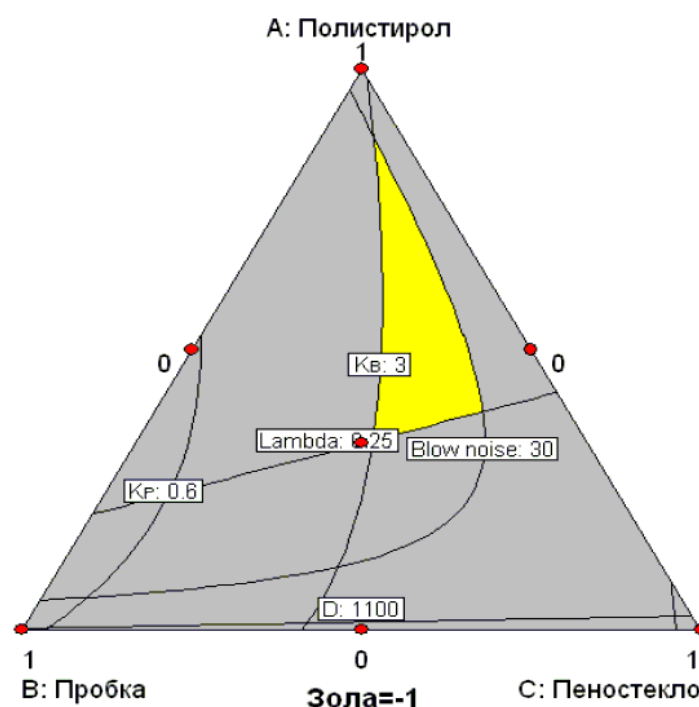


Рис.4. Отображение геометрической оптимизации композита в форме оверлейной диаграммы. Область допустимых составов – светлая.

На оверлейной диаграмме при минимальном содержании золы ( $X_4=-1$ ) светлым цветом обозначена область допустимых составов, образованная изолиниями для ударного шума, теплопроводности и индекса водостойкости в соответствии с ограничениями табл 1. Очевидно, использование в качестве ограничений только коэффициента размягчения привело бы к расширению области допустимых решений и увеличению неопределенности метода. Выбор ограничения на индекс водостойкости ( $K_v > 3$ ) позволяет из категории относительно водостойких материалов выбрать те, у которых прочность в водонасыщенном состоянии (ключевой признак водостойкости) достаточно велика.

Допустимой области, в частности, принадлежит и состав с оптимальным набором эксплуатационных характеристик, полученный методом функции желательности: доля полистирола в смеси наполнителей – 0,575, пробки – 0,136, пеностекла – 0,289, зола-цементное отношение – -1 (1,11); со следующими свойствами:

плотность 1008 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие 6,37 МПа, прочность на изгиб 0,65 МПа, теплопроводность 0,241 Вт/(м\* К), коэффициент звукопроницаемости 0,033, ударный шум 31 дБ, коэффициент размягчения 0,73, индекс водостойкости 3,21. При максимальном содержании золы (X<sub>4</sub>=1) допустимых областей не обнаружено.

Таким образом, предложенная характеристика водостойкости гипсосодержащих композитов *K<sub>в</sub>*, отображает эксплуатационные характеристики материала в условиях увлажнения более корректно, чем традиционно используемый коэффициент размягчения *K<sub>р</sub>*. Хотя нормативный коэффициент размягчения *K<sub>р</sub>* позволяет оценивать водостойкость чистых вяжущих, однако предлагаемый индекс водостойкости *K<sub>в</sub>* является более объективной характеристикой при оценке водостойкости высоконаполненных теплозвукоизолирующих композиций с учетом прочностных характеристик во влажном состоянии.

## Литература

1. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве / В.Ф. Коровяков // Химия современных строительных материалов. - 2003. – вып. №4. - 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. Фощ А.В. Оцінка якості гідрофобізуючих добавок та їх вплив на водостійкість гіпсу / А.В. Фощ, В.Я. Керш, А.В. Колесніков // Зб. праць УкрДУЗТ, Харків -2015р - вип. №157- С.49-53.
6. Халиуллин М.И. Композиционное гипсовое вяжущее на основе местного сырья // М.И. Халиуллин., М.Г. Алтыкис, Р.З. Рахимов. Актуальные вопросы строительства. Вторые Соломатовские чтения. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. – С. 156-157.
7. Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Штукатурные сухие смеси на основе композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости компонентов // Известия КазГАСУ, 2010, № 2. – С. 292-296.
8. Гасан Ю.Г. Особливості складу та структуроутворення композитів на основі енергозберігаючої модифікованої зологіпсоцементної в'язучої речовини для виготовлення виробів зовнішнього опорядження будинків /Ю.Г. Гасан, Г.В. Кучерова, О.В. Сергієнко // Науково-технічний збірник «Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка», Київ: Товариство «Знання» України, 2013р.- Вип. №48.- С.122-127.

## Referents

1. Korovyakov V.F. Gy'psovyye vyazhushhy'e y' y'x pry'meneny'e v stroy'tel'stve / V.F. Korovyakov // Xy'my'ya sovremennykh stroy'tel'nykh matery'alov. - 2003. – vy'p. #4. - S.18-25.
2. Gy'psovyye matery'aly y' y'zdely'ya (proy'zvodstvo y' pry'meneny'e) / Pod red. A.V. Ferronskoj – M.: ASV, 2004. - 488 s.
3. Ferronskaya A.V. Razvy'ty'e teory'y' y' prakty'ky' v oblasti' gy'psovykh vyazhushhy'x veshhestv // Sb. «Razvy'ty'e teory'y' y' technology'j v oblasti' sy'ly'katnykh y' gy'psovykh matery'alov». Ch.1. M., MGSU, 2000. s.47 – 56.
4. Volzhensky'j A.V. Gy'psocementno-puczczolanovyye vyazhushhy'e, betony y' y'zdely'ya / A.V. Volzhensky'j, V.Y'. Stambulko, A.V. Ferronskaya. – M.: Strojy'zdat, 1971. – 318 s.
5. Foshh A.V. Ocinka yakosti gidrofobizuyuchy'x dobavok ta yix vply'v na vodostojkist' gipsu / A.V. Fosh, V.Ya. Kersh, A.V. Kolesnikov // Zb. prac' UkrDUZT, Har'kiv -2015r - vy'p. #157- S.49-53.
6. Xaly'ully'n M.Y'. Kompozy'cy'onnoe gy'psovoe vyazhushhee na osnove mestnogo syr'ya // M.Y' Xaly'ully'n., M.G. Altyky's, R.Z. Raxy'mov. Aktual'ny'e voprosy stroy'tel'stva. Vtorye Solomatovskyye chteny'ya. Matery'aly Vserossy'jskoj nauchno-texny'cheskoj konferency'y'. – Saransk: Y'zd-vo Mordov. un-ta, 2003. – S. 156-157.
7. Xaly'ully'n M.Y'., Gajfully'n A.R. Shtukaturnyye suxy'e smesy' na osnove kompozy'cy'onnogo gy'psovogo vyazhushhego povyshennoj vodostojkosti' komponentov // Y'zvesty'ya KazGASU, 2010, # 2. – S. 292-296.
8. Gasan Yu.G. Osobly'vosti skladu ta strukturoutvorennya kompozy'tiv na osnovi energozberigayuchoyi mody'fikovanoj zologipsocementnoj v'yazhuchoyi rechovy'ny' dlya vy'gotovlennya vy'robiv zovnishn'ogo oporyadzhennya budy'nkiv /Yu.G. Gasan, G.V. Kucherova, O.V. Sergiyenko // Naukovo-texnichny'j zbirny'k «Budivel'ni materialy', vy'roby' ta sanitarna tekhnika», Ky'yiv: Tovy'rstvo «Znannya» Ukrayiny', 2013r.- Vy'p. #48.- S.122-127.

У статті розглядається оцінка водостійкості теплозвукоізолюючих композиційних матеріалів на основі гіпсу з допомогою нового параметра - індексу водостійкості. Розглядаються перспективи застосування композиційних матеріалів на основі гіпсу для внутрішніх стін, перегородок і підлоги будівель, що забезпечують теплоізоляцію і акустичний комфорт. Гіпсові композити є екологічно чистими, вигідними для використання з екологічної і технологічних позицій, однак їх застосування вимагає істотне збільшення їх водостійкості. З цією метою розглядається можливість вдосконалення опису водостійкості гіпсових композитів. Показано, що водостійкість може бути описана кількома способами. Поряд з традиційним

коефіцієнтом розм'якшення пропонується використовувати величину, що більш адекватно оцінює водостійкість композитів і її ключову характеристику - міцність матеріалу в водонасиченому стані. Пропонується використовувати цю величину для класифікації та оцінки можливості застосування матеріалів, а також при оптимізації їх складів, як частковий критерію. Розглянуто оптимізацію композиту на основі зологіпсоцементного матричного матеріалу і суміші трьох видів наповнювачів, що служать для поліпшення тепло- і звукоізолюючих властивостей. Побудовано експериментально-статистичні моделі експлуатаційних характеристик, в тому числі і коефіцієнта розм'якшення, і індексу водостійкості. Розглядається геометрична оптимізація властивостей композиту, що дозволяє виділити область допустимих складів, а також результат чисельної оптимізації, що дозволяє вибрати в цій області склад з оптимальним набором експлуатаційних характеристик. Застосування індексу водостійкості в задачах оптимізації теплозвукоізолюючих складів дозволяє, зокрема, здійснювати спрямований вибір оптимальних складів з допустимої області.

**Ключові слова:** індекс водостійкості, гіпсові композити, коефіцієнт розм'якшення, оптимізація, експериментально-статистичні моделі

The article discusses the assessment of the water resistance of heat and sound insulating composite materials based on gypsum using a new parameter - the water resistance index. The prospects for the use of gypsum-based composite materials for interior walls, partitions and floors of buildings that provide thermal insulation and acoustic comfort are considered. Gypsum composites are environmentally friendly, beneficial for use from environmental and technological positions, but their use requires a substantial increase in their water resistance. For this purpose, the possibility of improving the description of the water resistance of gypsum composites is being considered. It has been shown that water resistance can be described in several ways. Along with the traditional softening coefficient, it is proposed to use a value that more adequately evaluates the water resistance of composites and its key characteristic - the strength of the material in a water-saturated state. It is proposed to use the developed characteristic for classifying and evaluating the possibility of using materials, as well as when optimizing their compositions, as a particular criterion. The optimization of a composite based on a gypsum-cement-ash matrix material and a mixture of three types of fillers that served to improve the heat and sound insulating properties is considered. Experimental-statistical models of performance, including the softening coefficient and water resistance index, are built. We consider the geometric optimization of the properties of the composite, allowing you to select the range of acceptable compositions, as well as the result of numerical optimization, allowing you to select a composition in this area with an optimal set of performance characteristics. The application of a water resistance index in optimization problems of heat and sound insulating compositions allows, in particular, to make a directional choice of optimal compositions from an acceptable range.

**Keywords:** water resistance index, gypsum composites, softening coefficient, optimization, experimental-statistical models

## Відомості про авторів

*Керш В. Я. к-т техн. наук, професор кафедри городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (067)775-42-04 E-mail: [ykersh@hotmail.com](mailto:ykersh@hotmail.com)*  
*Kersh V.Ya. Cand. Sc., Prof. Department of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel. : (067) 775-42-04 E-mail: [ykersh@hotmail.com](mailto:ykersh@hotmail.com)*

*Колесников А.В. к-т техн. наук, ст. препод. Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (050)554-84-13 E-mail: [kolesn@stikonet.od.ua](mailto:kolesn@stikonet.od.ua)*  
*Kolesnikov A. V. Cand. Sc., Assistant Prof. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Te. : (050)554-84-13 E-mail: [kolesn@stikonet.od.ua](mailto:kolesn@stikonet.od.ua)*

*Фоц А. В. к-т техн. наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (097)045-62-62 E-mail: [nikitkos@gmail.com](mailto:nikitkos@gmail.com)*  
*Foshch A. V. Cand. Sc., Associate Prof. Department of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture Tel.:(097)045-62-62 E-mail: [nikitkos@gmail.com](mailto:nikitkos@gmail.com)*

*Щербина В.С., магистр кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (067) 775-42-04, E-mail: [viktoria14009@gmail.com](mailto:viktoria14009@gmail.com)*  
*Scherbina V.S., Graduate Student, Department of Urban Construction and Economy, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Tel. : (067) 775-42-04, E-mail: [viktoria14009@gmail.com](mailto:viktoria14009@gmail.com)*