

## РОЛЬ МЕЖПОРОВЫХ ПЕРЕГОРОДОК В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ ВИСОКОНАПОЛНЕННОГО ГИПСОПЕРЛИТОВОГО КОМПОЗИТА

Довгань И.В., д.х.н., профессор,

Керш В.Я., к.т.н., профессор,

Колесников А.В.,

Семенова С.В., к.т.н., доцент

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
svetas@inbox.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы структурно-функционального моделирования высоконаполненных гипсовых композитов. Предполагается, что основным элементом структуры материала, существенно влияющим на основные свойства, являются межпоровые промежутки, заполненные твердой частью композита. Рассмотрены результаты применения оптического метода выделения межпоровых промежутков, основанные на алгоритме сегментации методом водораздела. Для площадей проекций промежутков построены гистограммы распределения. Доля интервалов, соответствующих каждому бину гистограммы, использовалась для построения регрессионных моделей. На основе построенных моделей проведена структурная оптимизация материала, определены доли промежутков с соответствующих интервалов, отвечающих оптимальному набору свойств.

**Ключевые слова:** гипс, высоконаполненные композиты, межпоровые интервалы, промежутки, регрессионные модели, оптимальная структура.

## РОЛЬ МІЖПОРОВИХ ПЕРЕГОРОДОК В ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОНАПОВНЕННОГО ГІПСОПЕРЛИТОВОГО КОМПОЗИТУ

Довгань І.В., д.х.н., професор,

Керш В.Я., к.т.н., професор,

Колесников А.В.,

Семенова С.В., к.т.н., доцент

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
svetas@inbox.ru

**Анотація.** У статті розглядаються питання структурно-функціонального моделювання високонаповнених гіпсових композитів. Передбачається, що основним елементом структури матеріалу, який істотно впливає на основні властивості, є міжпорові проміжки, заповнені твердою частиною композиту. Розглянуто результати застосування оптичного методу виділення міжпорових проміжків, що засновані на алгоритмі сегментації методом водорозділу. Для площ проекцій проміжків побудовано гістограми розподілу. Частка інтервалів, що відповідає кожному бину гістограми, використовувалася для побудови регресійних моделей. На основі побудованих моделей проведена структурна оптимізація матеріалу, визначені частки проміжків з відповідних інтервалів, що відповідають оптимальному набору властивостей.

**Ключові слова:** гіпс, високонаповнені композити, міжпорові інтервали, проміжки, регресивні моделі, оптимальна структура.

## ROLE OF INTERPOROUS GAPS IN PROPERTIES FORMATION OF HIGHLY FILLED GIPSUM-PERLITE COMPOSITE

**Dovgan I.V.**, Doctor of Chemistry, Professor,

**Kersh V.Y.**, PhD, Professor,

**Kolesnikov A.V.**,

**Semenova S.V.**, PhD, Assistant Professor.

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

svetas@inbox.ru

**Abstract.** This article discusses the structural and functional modeling of highly filled gypsum composites. It is assumed that the main element of material structure, substantially affects on the thermal conductivity, strength and acoustic properties, is interporous gaps filled with a solid portion of the composite. The results of interporous gaps isolation, based on an algorithm of the image watershed segmentation, are considered. The distribution histogram of the areas of the interstices projections was built. The proportion of intervals corresponding to each histogram bins were used as regression variables to construct models of the properties - the density, compressive and tensile strength, thermal conductivity, adhesion strength and acoustic permeability. Research of the coefficients of regression models shows that the dependence of the considered structural characteristics is determined primarily by density. Predominance partitions  $\sim 0.15$  and  $\sim 0.4-0.45$  mm<sup>2</sup> increases density, improved strength properties, increases thermal conductivity. Average partitions of  $\sim 0.25-0.35$  mm<sup>2</sup>, obviously, are surrounded by many pores and closely coexist with them in a structural ensemble, which is not typical for groups of 0.15 and 0.4 mm<sup>2</sup>. Considered the nature of the impact of different size groups gaps on the properties allowed to go to the four groups of aggregated intervals. For these non-linear regression models are built, some of them, in particular - thermal conduction model have a high coefficient of determination ( $R^2 = 0,97$ ) and are suitable for rapid evaluation of performance. On the basis of the constructed models structural optimization of the material carried out. We determined the proportion of interstices in the corresponding groups appropriate to the optimum set of properties. Structural modeling problems discussed reveals the causal relationships between the structure of this class of materials and its properties.

**Keyword:** gypsum, highly filled composites, interporous gaps, partitions, interstices, regression models, optimal structure

**Введение.** Создание максимально эффективных и недорогих строительных материалов, обеспечивающих оптимальный набор эксплуатационных характеристик – теплопроводности, прочности, адгезионной активности, является острой необходимостью для строительной отрасли Украины. К таким материалам относятся материалы на основе гипсовых вяжущих с теплоизолирующими заполнителями: перлитом, вермикулитом, пенополистирольными гранулами.

**Цели и задачи исследования.** Целенаправленный подбор составов реализуется значительно проще, если при этом учитывать структурные особенности материала. Соотношения «структура–свойства» характеризуются существенной стабильностью и сообщают получаемым статистическим моделям большую универсальность. Поэтому представляет интерес исследование структуры высоконаполненных гипсовых композиций и ее корреляции с эксплуатационными характеристиками.

**Объекты исследования.** Гипсовые материалы с высокой степенью заполнения можно рассматривать как аналог ячеистых композитов, так как пористые заполнители, типа перлита или вермикулита, по прочностным и теплофизическим характеристикам подобны воздушным включениям. Твердая фаза, образованная затвердевшим раствором вяжущего, распределена в объеме материала в виде межпоровых перегородок, окружающих как воздушные поры, так и «псевдопоры» в виде зерен теплоизолирующего заполнителя. Параметры, характеризующие межпоровые перегородки являются важнейшими для ряда

свойств ячеистого бетона, например таких, как прочность, тепло- и звукопроводность [1].

**Методы исследования.** Предположение о существенной роли структурных особенностей, в частности – макроструктуры, в формировании эксплуатационных характеристик высоконаполненного гипсоперлитового композита подтверждено при исследовании компьютерной микроскопией 18-ти опытных образцов, изготовленных по четырехфакторному плану [2, 3]. Выделение проекции межпоровых промежутков осуществлено с помощью метода «водораздела» [4] (рис.1).

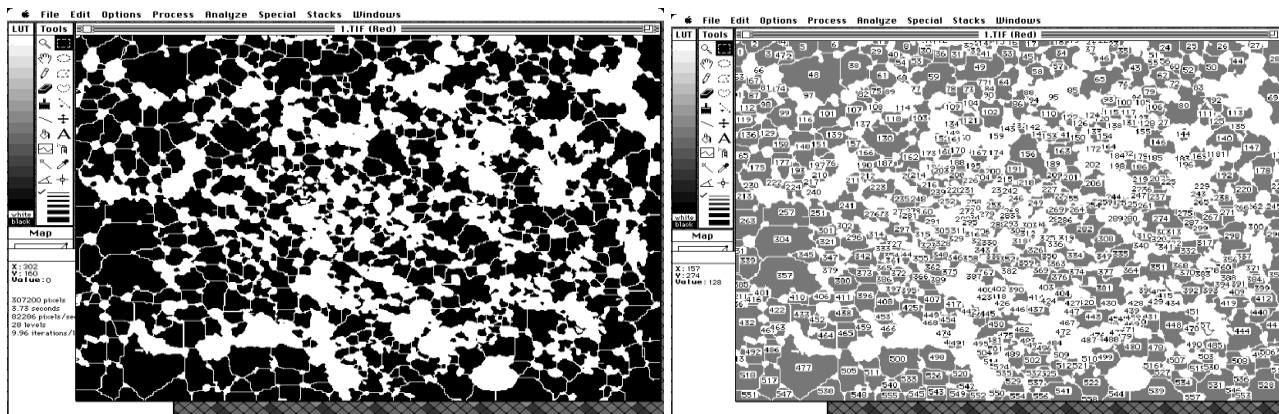


Рис. 1. Сегментация межпорового пространства методом водораздела и выделение межпоровых перегородок

**Результаты исследований.** На основании полученной информации оказалось возможным построить регрессионные модели «структура–свойства». С этой целью в качестве основной геометрической характеристики была использована площадь поверхностей однородных областей изображения, соответствующих проекциям межпоровых интервалов. Построено распределение относительных частот и гистограмма с фиксированным числом бинов (10) в интервале 0-0,5 мм<sup>2</sup>, охватывающем 99% перегородок. На рис.2 приведен пример полученной гистограммы (образец № 9), в таб. 1 – относительное частотное распределение областей однородности.

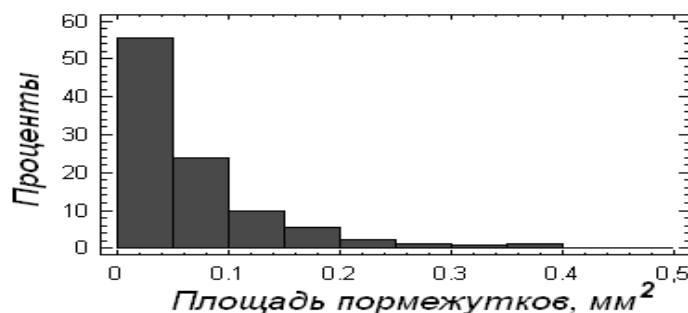


Рис.2. Распределение частот межпоровых перегородок 10 размерных групп

Изложенные выше данные позволили перейти к статистическому анализу структурных характеристик. В рассматриваемом случае идет речь о смесевой системе, в которой суммарная доля пор равна 1. Результаты применения методов линейной множественной регрессии для полного числа групп приведены ниже (табл.1). Высокие значения коэффициентов детерминации  $R^2$  (обычного и скорректированного), адекватность других статистических характеристик позволяют рекомендовать использовать рассмотренные модели для экспресс-оценки плотности (Dens), прочности при сжатии ( $R_c$ ) и изгибе ( $R_b$ ), теплопроводности (Lamb). В то же время зависимость адгезионной прочности ( $R_{adh}$ ) и звукопроницаемости (Tau) от характеристик межпоровых интервалов выражена слабее. Это

может быть связано с существенным влиянием на эти характеристики структурных свойств других видов (в частности, непосредственно пор), а также эффектов синергизма и антагонизма.

Таблица 1 – Регрессионные коэффициенты 10 размерных групп межпоровых перегородок

Размерные группы	Регрессионные коэффициенты для свойств					
	Dens	R <sub>c</sub>	R <sub>b</sub>	Lamb	R <sub>adh</sub>	Tau
0_025	0,48	0,74	0,36	0,09	0,36	0,50
0_075	0,32	-2,77	-0,75	0,07	-2,07	1,07
0_125	3,51	41,79	13,30	0,95	13,72	-0,39
0_175	-0,71	-21,77	-1,59	-0,29	-6,85	0,56
0_225	-0,57	-11,55	-2,77	-0,20	-5,85	-0,42
0_275	-4,31	-38,41	-12,67	-1,54	2,06	9,45
0_325	-12,70	-108,86	-53,52	-2,95	-26,73	-5,33
0_375	1,45	5,33	1,40	0,91	19,85	-1,89
0_425	8,93	94,63	22,07	2,70	25,66	3,95
0_475<	13,79	75,77	28,96	3,99	-31,19	-12,45
R-sq	81,86	83,75	80,57	67,52	52,68	54,27
Adj R-sq	61,46	65,46	58,72	30,99	8,10	1,00

Содержательное значение соответствующих регрессионных моделей удобно изучать на нормированном графике влияния перегородок разной площади (рис.3). Из графика видно, что характер зависимостей свойств от рассматриваемой структурной характеристики в основном определяется плотностью. Преобладание перегородок  $\sim 0,15$  и  $\sim 0,4-0,45$  мм<sup>2</sup> приводит к увеличению плотности, улучшению прочностных характеристик, увеличению теплопроводности. Перегородки средней группы  $\sim 0,25-0,35$  мм<sup>2</sup>, очевидно, окружены многими порами и тесно сосуществуют с ними в структурном ансамбле, что не характерно для групп  $0,15$  и  $0,4$  мм<sup>2</sup>. Эти перегородки могут переходить одна в другую и представлять собой своеобразный вариант вероятностной упаковки тел неправильной формы.

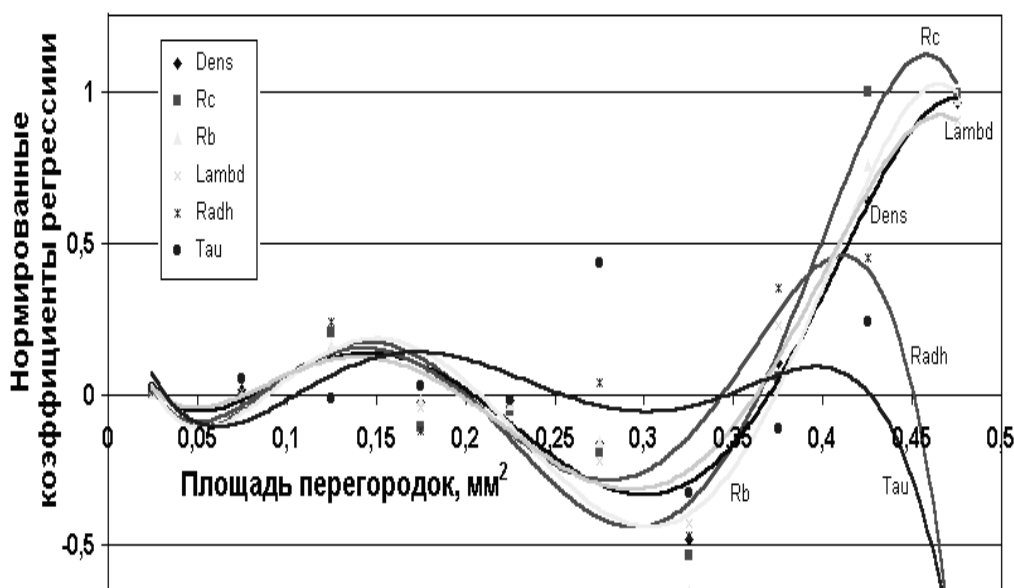


Рис.3. Нормированный график влияния межпоровых перегородок различных размеров на свойства материала

Из приведенных выше данных, касающихся линейной модели, а также из представленного графика видно, что по степени и знаку влияния на свойства некоторые

соседствующие группы подобны. Представляет интерес математическая модель с укрупненными группами с учетом их нелинейного влияния на свойства. С этой целью исходя из приведенных выше предварительных закономерностей было осуществлено укрупнение некоторых групп и принят переход от долей перегородок в смесевой регрессионной модели к концентрациям перегородок соответствующих групп – количеству на 1 мм<sup>2</sup> препарата. Соответствующие диапазоны изменения площадей перегородок и условные названия групп приведены ниже в табл. 2.

Таблица 2 – Интервалы площадей межпоровых перегородок и их условные названия

Интервал	1	2	3	4
Условное название	Sm_p	Med_p	Big_p	Vbig_p
Нижняя граница	0	0,1	0,2	0,35
Верхняя граница	0,1	0,2	0,35	0,5
Середина	0,05	0,15	0,275	0,425

На основе полученных данных оказалось возможным построение нелинейных регрессионных моделей основных свойств материала. Регрессионная модель взаимосвязи «структура-теплопроводность» и график соответствующей зависимости «наблюдаемая-предсказанная величина» приведены на рис. 4.

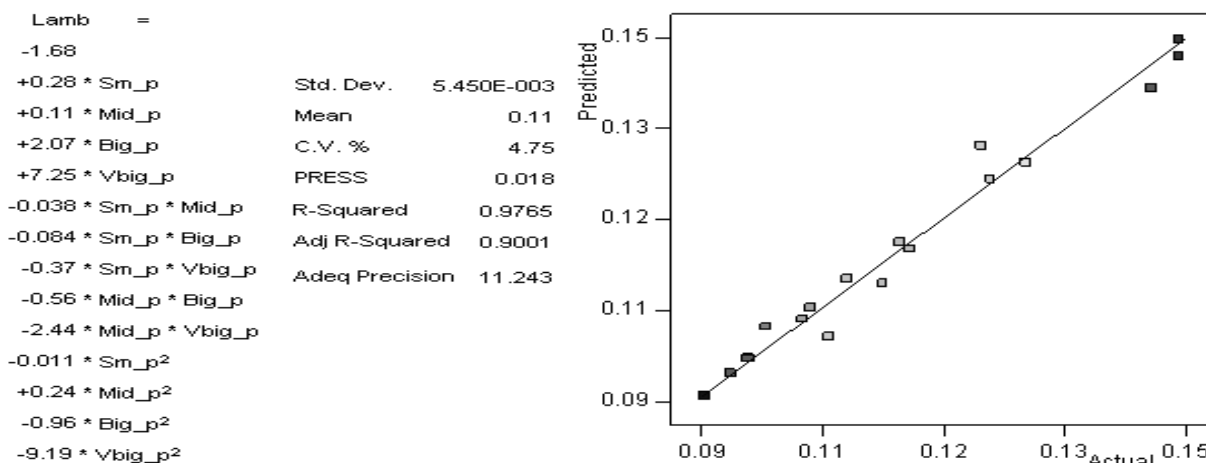


Рис.4. Регрессионная модель и график зависимости «наблюдаемая-предсказанная величина» для теплопроводности

Все линейные влияния характеризуются положительными коэффициентами, почти все квадратичные – отрицательными. Перенос тепла осуществляется по межпоровым перегородкам. Поры между перегородками и «узкие места» представляют собой участки высокого теплового сопротивления. Кроме того, поры и перегородки способны образовывать чередующиеся структуры, характеризующиеся низкой теплопроводностью. Пути распространения тепла пролегают по межпоровым перегородкам, соединенным «узкими местами» в области контакта. Поровая структура, границы раздела и «узкие места» неявно входят в квадратичные слагаемые.

Поскольку рассмотренные выше и подобные им регрессионные модели содержат основные уравнения взаимосвязи «структура-свойства» для поровых перегородок, представляет интерес задача структурной оптимизации на их основе. Требования, ограничения и степень важности оптимизационных факторов [3, 4] приведены в табл. 3, существенные ограничения выделены рамкой:

Таблица 3 – Характер факторов оптимизации

Название критерия	Цель	Нижний предел	Верхний предел	Степень важности
Latex	minimize	-1	1	2
$\rho$	minimize	450	600	3
Rb	maximize	0,5	1,04	3
Rc	maximize	1	2,53	5
$\lambda$	minimize	0,093	0,2	5
Radh	maximize	0,2	0,85	5
$\tau$	minimize	0,3	0,5	4

На основании указанных выше предельных ограничений удается построить оверлейные графики допустимых областей – провести геометрическую оптимизацию. При построении рассмотрены изолинии свойств на плоскости, соответствующей первым двум факторам – концентрации малых (Sm\_p) и средних (Mid\_p) перегородок при разных значениях двух остальных факторов (Vbig\_p, Vbig\_p). Для последних выбраны граничные и центральные значения, как при планировании эксперимента (табл. 4). Области структурных характеристик, обуславливающих допустимый набор свойств, выделены белым цветом (рис. 5, рис. 6).

Таблица 4 – Характер решений задач оптимизации

Характеристика	Big_p (код.)	Vbig_p (код.)	Big_p	Vbig_p
Нет решений	+	+	0.690	0.197
Нет решений	+	0	0.690	0.106
Рис.5, А	+	-	0.690	0.016
Нет решений	0	+	0.345	0.197
Рис.5, Б	0	0	0.345	0.106
Нет решений	0	-	0.345	0.016
Рис.6, А	-	+	0	0.197
Рис. 6, Б	-	0	0	0.106
Нет решений	-	-	0	0.016

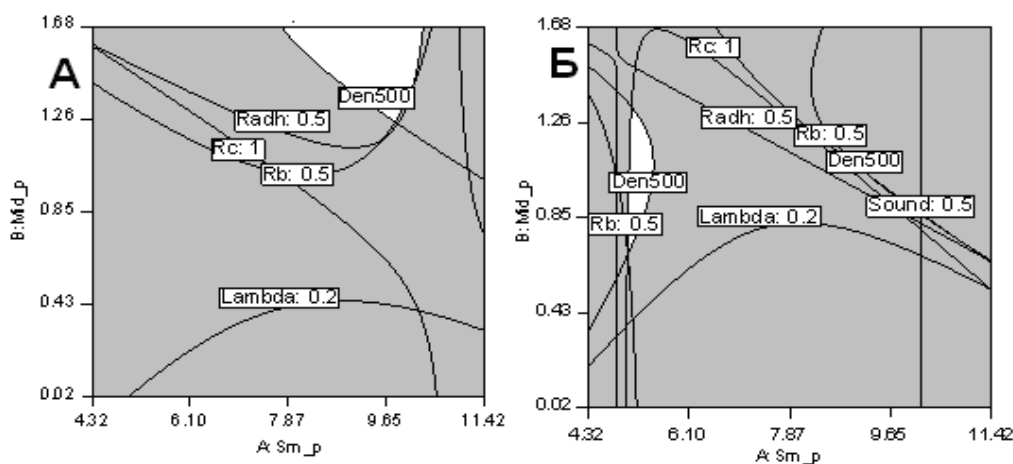


Рис. 5. Диаграммы допустимых структурных характеристик

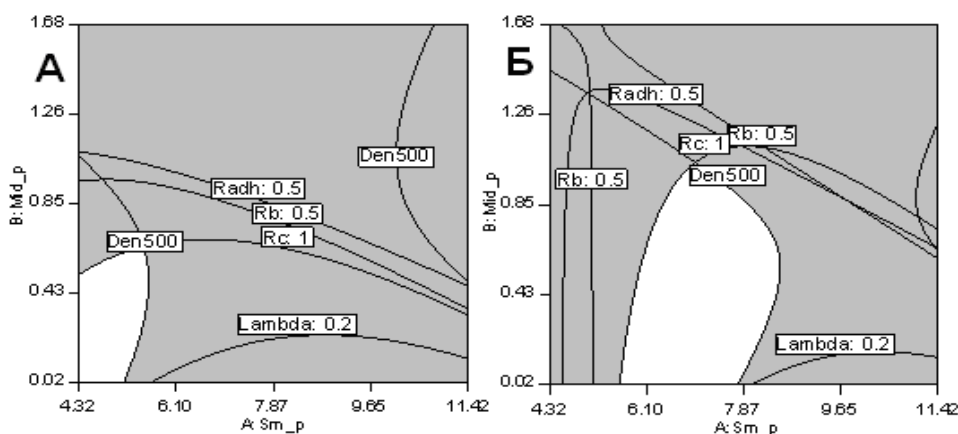


Рис. 6. Диаграммы допустимых структурных характеристик

Наряду с геометрической оптимизацией – выделения области допустимых решений – интерес представляет численная многокритериальная оптимизация и определение оптимальной структуры. Такая оптимизация была осуществлена методом функции желательности, в результате чего были получены оптимальные решения. После исключения физически некорректных вариантов набор оптимальных решений выглядит следующим образом (таб. 5).

Таблица 5 – Свойства и параметры композитов оптимальной структуры

N	Sm_p	Mid_p	Big_p	Vbig_p	Dc	R <sub>b</sub>	R <sub>c</sub>	Lambda	R <sub>adh</sub>	Tau
1	11,42	0,37	0,00	0,040	452,47	0,83	3,05	0,038	1,02	0,48
2	11,28	0,33	0,00	0,030	451,08	0,84	2,92	0,045	1,02	0,48
3	11,04	0,51	0,00	0,060	468,76	1,02	3,68	0,035	1,26	0,49
4	5,940	1,44	0,41	0,020	493,43	0,80	1,73	0,105	0,71	0,49
5	4,320	1,56	0,48	0,100	491,14	0,79	1,99	0,102	0,58	0,49

**Выводы.** Таким образом, оптический метод выделения межпоровых интервалов совместно с приемами статистической обработки позволяет определять структурные корреляты макроскопических свойств материала, наблюдаемых в экспериментах, производить их экспресс-оценку и проводить структурно-функциональную оптимизацию композиционных составов. Зависимость «структура-свойства» отличается значительной универсальностью и позволяет охватить широкую область характеристик теплоизоляционных материалов.

### Литература

1. Керш В.Я. Влияние параметров твердой составляющей на теплозащитные свойства ячеистого бетона / В.Я. Керш, П.Н. Чабаненко // Зб. наук. праць „Композиційні матеріали для будівництва”, – Макеевка: ДонДАБА, 2005. – С. 97 – 100.
2. Ляшенко Т.В. ЭС-модели и многокритериальная оптимизация при разработке теплоизоляционных гипсовых штукатурных композиций / Т.В. Ляшенко, В.Я. Керш, А.В. Колесников // Вісник ОДАБА.– Одеса, Зовнішрекламсервіс, 2015. – вип.№ 57. – С. 279-282.
3. Kersh V. Structurally-Oriented Design of the Heat Insulation Plastering Material / V. Kersh, A. Kolesnikov, T. Lyashenko, M. Pidkapka, // No: Proceedings of REHVA Annual Conference 2015, - Latvija, Rīga, 6.-9. maijs, 2015. Rīga: RTU PRESS, 2015.- Lpp.241.-244. ISBN 978-9934-10-685-9
4. Довгань И.В. Статистическое исследование поровой структуры теплоизоляционных композитов / И.В. Довгань, В.Я. Керш, А.В. Колесников, С.В. Семенова // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2015. – вип. № 60. – С. 86-90.