

УДК 666:536

Керш Д.В., аспирант,  
 Ляшенко Т.В., доктор техн. наук, профессор,  
 Одесская государственная академия строительства и  
 архитектуры, г. Одесса, Украина

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СФЕРОГИПСОБЕТОНА

Одной из важнейших задач современного строительства является обеспечение качественной теплозащиты зданий, причем нормируется сопротивление теплопередаче не только наружных ограждающих конструкций, но и внутренних перегородок. К числу эффективных теплоизолирующих материалов можно отнести гипсобетоны пониженной плотности - композиционные материалы, основой состава которых является гипсовое вяжущее и лёгкий заполнитель. Положительными свойствами таких материалов являются сравнительно небольшая плотность, огнестойкость, хорошая звукоизоляция. В качестве легкого заполнителя используют керамзит, аглопорит, вспученный вермикулит, перлит, шлаковый песок, древесные опилки, отходы поролон, пористую резиновую крошку и др., введение которых снижает плотность и теплопроводность материала [1]. Однако водопоглощение самих пористых заполнителей очень велико, поэтому при их введении повышается водопотребность гипсобетонной смеси, что влечет за собой значительное (до 50%) снижение механической прочности гипсобетонных изделий.

Применение в качестве заполнителя водонепроницаемых микросфер (ценосфер) размером от 5 до 300 мкм, образующихся в составе золы уноса, в значительной степени решает эту проблему. Целесообразность применения ценосфер в качестве заполнителя в гипсобетоне также обусловлена сочетанием их уникальных свойств: низкой плотностью и теплопроводностью, малыми размерами, сферической формой, химической инертностью, высокой твердостью и температурой плавления.

В эксперименте по замене части вяжущего марки Г5 ценосферами объемный расход последних изменялся от 0 (контрольный образец) до 90% от объема гипса. Результаты испытаний опытных образцов гипсобетона с ценосферным заполнителем (сферогибсобетона) в сухом состоянии приведены на рис. 1.

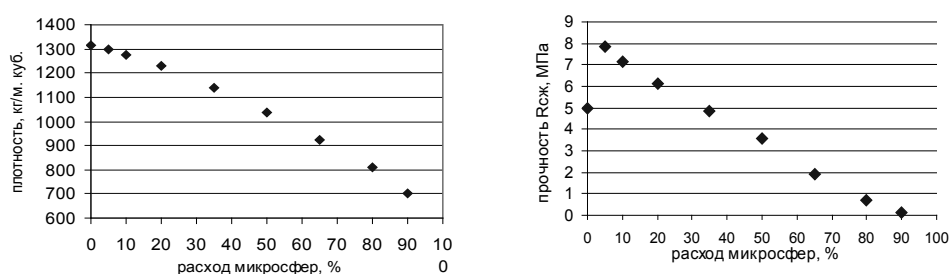


Рисунок 1 - Влияние ценосфер на плотность и прочность полистиролгипсобетона

В целом характер влияния ценосферного заполнителя на свойства сферогибсобетона (СГБ) вполне предсказуем - с увеличением количества ценосфер плотность и прочность снижаются. Однако при расходе ценосфер в пределах 5-20 объемных процентов отмечается возрастание прочности СГБ (например, при расходе ценосфер 5% прочность при сжатии увеличивается в 1,6 раза), что характерно только для данного заполнителя (рис. 1). Этот эффект принципиально отличает влияние ценосфер на прочностные свойства гипсобетона от влияния других легких заполнителей, в частности, перлита и вермикулита, стабильно снижающих прочность при любых дозировках.

При 50%-ной замене вяжущего ценосферами теплопроводность СГБ снижается до 0,16-0,18 Вт/м·К, а прочность составляет 3,5 МПа, что, в принципе, является достаточным для гипсобетонных перегородок. При этом масса перегородок уменьшается в 1,5 раза.

Введение в смесь перлитового песка с насыпной плотностью 80 кг/м<sup>3</sup> обеспечивает дополнительное снижение плотности СГБ. Этой же цели служит поризация гипсовой матрицы за счет воздухововлекающих добавок. Повышение водопотребности смеси и сопутствующее этому снижение прочности компенсируются за счет введения пластифицирующих добавок. В результате анализа отечественных и зарубежных химических добавок для дальнейших экспериментов приняты пластифицирующая комплексная добавка - суперпластификатор для бетонов и растворов Релаксол - Супер ПК и воздухововлекающая добавка «Centrament Air».

В предварительных экспериментах определены основные факторы, влияющие на формирование свойств СГБ, и оценены пределы их варьирования.

Для основного эксперимента использован 4-факторный план. Уровни факторов приведены в таблице 1.

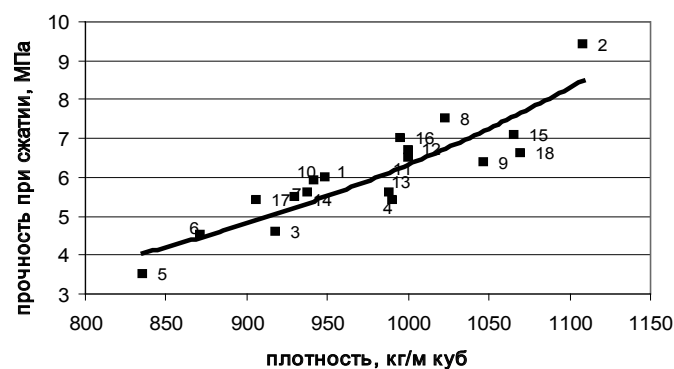
**Таблица 1**

Уровни параметров композиции в эксперименте и пределы их варьирования

i	Фактор $X_i$		Уровни		
			$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Количество заполнителя – (% от объема гипса):	ценосфер (CS)	30	50	70
2		перлита (P)	0	15	30
3	Дозировки химдобавок - (% от массы гипса):	суперпластификатора (SP)	0,3	0,5	0,7
4		воздухововлекающей добавки (AE)	0,2	0,5	0,8

Изготовлено 54 образца по 3 в каждой точке плана. Определены их водопотребность  $W$  (кг на 1 кг сухой смеси) и водогипсовое отношение  $W/G$ , а также уровни свойств материалов, в том числе: плотность, прочность при сжатии и при изгибе, теплопроводность и звукоизолирующие свойства. Первые три свойства определялись стандартно, теплопроводность – методом плоского теплового импульса, характеристика звукоизолирующей способности материала  $R_s$  [2] – с помощью специально разработанной камеры.

Связь прочности гипсобетона при сжатии с плотностью отображает график на рис. 2.



**Рисунок 2.** Диаграмма «плотность гипсобетона – прочность»

Прочность на сжатие исследованных образцов варьирует в пределах от 4 до 9 МПа. В то же время, как показано на рис. 1, даже при одинаковой плотности, прочность изменяется в широких пределах (например, при  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $R_{сж}$  колеблется от 5,3 до 7 МПа).

Для гипсобетона одинаковой плотности теплопроводность также может варьироваться в достаточно широких пределах. Как показано на графике (рис. 3), например при  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda$  изменяется от 0,25 до 0,28 Вт/(м\*К). Это указывает на то, что существуют значительные резервы для улучшения свойств материала за счет рецептурно-технологических факторов.

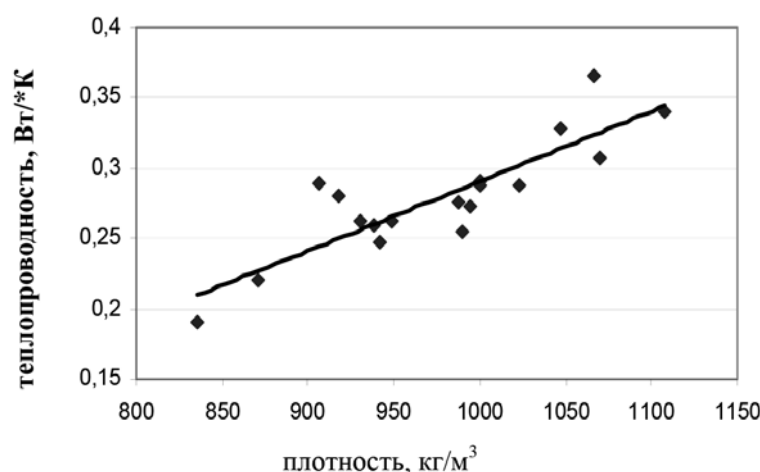


Рисунок 3. Влияние плотности гипсобетона на теплопроводность

Экспериментальные данные позволили описать поля свойств материала в пространстве четырех координат состава нелинейными 4-факторными ЭС моделями. В частности, уравнения (1-2) описывают поля прочности при сжатии и теплопроводности (со значимыми коэффициентами при 10% риске и ошибках эксперимента 1-6%):

$$\begin{aligned}
 R_c = & 5.46 - 0.75x_1 \pm 0 \quad x_1^2 \pm 0 \quad x_1x_2 + 0.19x_1x_3 \pm 0 \quad x_1x_4 \\
 & - 1.14x_2 \pm 0 \quad x_2^2 \quad + 0.22x_2x_3 \pm 0 \quad x_2x_4 \\
 & - 0.36x_3 + 0.40x_3^2 \quad \pm 0 \quad x_3x_4 \\
 & - 0.55x_4 \pm 0 \quad x_4^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 \lambda = & 0.265 - 0.034x_1 + 0.008x_1^2 \pm 0 \quad x_1x_2 \pm 0 \quad x_1x_3 - 0.009x_1x_4 \\
 & - 0.030x_2 + 0.015x_2^2 \quad + 0.006x_2x_3 - 0.006x_2x_4 \\
 & - 0.007x_3 \pm 0 \quad x_3^2 \quad \pm 0 \quad x_3x_4 \\
 & \pm 0 \quad x_4 \pm 0 \quad x_4^2
 \end{aligned} \quad (2)$$

Максимальные и минимальные уровни рецептурных полей некоторых свойств приведены ниже:

$$\rho_{\min} = 830 \text{ кг/м}^3 \quad (\text{при } x_1 = x_2 = +1, x_3 = -0.30, x_4 = 0.89), \quad (3)$$

$$\lambda_{\min} = 0.19 \text{ Вт/(м*К)} \quad (\text{при } x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = +1), \quad (4)$$

$$R_{c,\max} = 9.1 \text{ и } R_{b,\max} = 3.4 \text{ МПа} \quad (\text{при } x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1), \quad (5)$$

$$R_{S,\max} = 42.5 \text{ дБ} \quad (\text{при } x_1 = 0.8, x_2 = x_3 = x_4 = +1). \quad (6)$$

Анализ (3-6) показывает, что индивидуальные оптимумы свойств обеспечиваются разными составами, в частности, конкурентными для теплопроводности (4) и прочности (5). При разработке материала определенного назначения возникает необходимость поиска компромиссных решений.

Многокритериальная компромиссная оптимизация состава СГБ выполнена с использованием итерационного случайного сканирования рецептурных полей свойств [3, 4]. На каждой итерации в области поиска генерируется  $N$  (как правило, 10000) равномерно распределенных случайных вариантов рецептуры, задаваемых нормализованными переменными  $x_i$ . На начальной итерации поиск ведется во всей исследуемой факторной области полных рецептурных полей, описанных ЭС - моделями. Рассчитываются значения критериев в  $N$  случайных точках многомерного факторного куба, включая его вершины. Рецептурные комбинации, не обеспечивающие нормативных ограничений, удаляются. Затем область оставшихся, допустимых решений сжимается за счет пошагового приближения ее границ к индивидуальным оптимумам критериев оптимальности поочередно. Диапазоны компромисса сужаются до тех пор, пока в них не остается лишь несколько точек.

Уменьшенное на несколько порядков множество вариантов является базовым для следующей итерации. Возможные потери решений в промежутках между случайными точками компенсируются некоторым расширением полученной области по каждому  $x_i$ . В расширенной области вновь генерируется 10000 рецептурных вариантов и выполняется следующая итерация. Как правило, компромиссно оптимальные решения удается найти за 2-4 итерации [4].

Ниже представлены решения задач многокритериальной оптимизации, которые возникли при разработке облегченного гипсобетона, содержащего ценосферы и перлит. Были решены две группы задач. Для первой сформулированы следующие условия: плотность и теплопроводность должны быть сведены к минимуму, прочность при изгибе  $R_b$  должна быть максимальной при соответствии прочности на сжатие  $R_c$  нормативным требованиям  $R_{c, \text{norm}}$ . Решение было найдено для нескольких значений  $R_{c, \text{norm}}$ , указанных для материалов определенного назначения: 5 МПа (украинские требования для гипсовых перегородок), 4, 3.5. Предельно возможное значение для  $R_c$  – 5.58 МПа (если требуется повышенная надежность).

Выяснено, что некоторый компромисс между  $\rho_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{min}}$ , с одной стороны, и  $R_{b, \text{max}}$  с другой, может быть найден за счет наиболее «мощных» факторов - CS и P определенным снижением всех критериев оптимальности.

Получены следующие результаты, в частности, для  $R_{c, \text{norm}} = 5$  МПа (сочетания параметров разумно округлены):

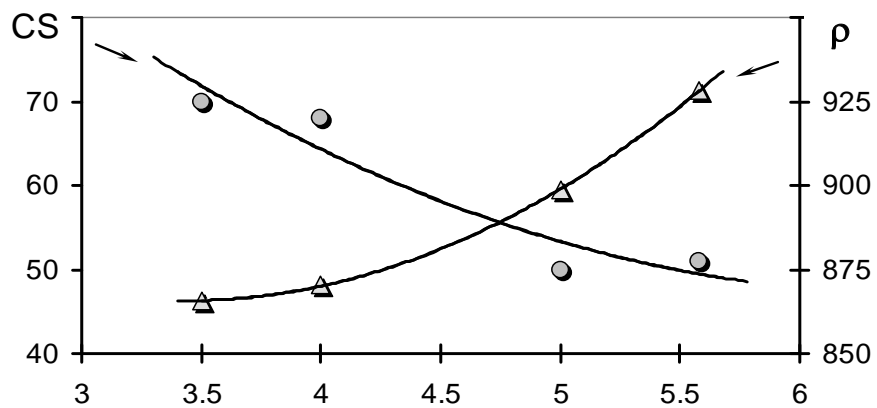
- содержание ценосфер CS = 50% ( $x_1 = 0$ );
- содержание перлита P = 30% ( $x_2 = +1$ );
- дозировка суперпластификатора SP = 0.3% ( $x_3 = -1$ );
- дозировка воздухововлекающей добавки AE = 0.35% ( $x_4 = -0.5$ ).

Эта композиция обеспечивает уровни свойств:  $R_c = 5.1$ ,  $R_b = 2.2$  МПа,  $\rho = 899$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 0.25$  Вт / (м • К).

На рис. 4 показаны расчетные расходы ценосфер и значения плотности в оптимально компромиссных смесях при 4-х уровнях  $R_{c, \text{norm}}$ . Чем больше требуется прочность материала, тем меньше можно вводить ценосфер. Это соотношение описывается квадратичной функцией, однако линейное приближение также является приемлемым.

Во второй серии задач оптимизации добавлен еще один критерий оптимальности: индекс звукоизоляции  $R_s$  должен быть максимальным. Вот результаты, полученные для  $R_c \geq 5$  МПа:

- CS = 42% ( $x_1 = -0.4$ );
- P = 26% ( $x_2 \approx 0.7$ );
- SP = 0.46% ( $x_3 = -0.2$ );
- AE = 0.5% ( $x_4 = 0$ ).



- CS = 42% ( $x_1 = -0.4$ );
- P = 26% ( $x_2 \approx 0.7$ );
- SP = 0.46% ( $x_3 = -0.2$ );
- AE = 0.5% ( $x_4 = 0$ ).

заданный уровень прочности  $R_{c.norm}$

**Рисунок 4** – Расход ценосфер и изменение плотности оптимально компромиссной гипсобетонной композиции при заданных уровнях прочности

Уровни свойств композиции:  $R_c = 5.0$ ,  $R_b = 2.0$  МПа,  $\rho = 906$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda = 0.27$  W/(m·K),  $R_c = 37.5$  dB.

#### Выводы

Предложен и изучен перспективный облегченный композит на гипсовой основе с ценосферным наполнителем. Индивидуальные и комбинированные эффекты влияния пропорций смеси на плотность, прочность, теплопроводность и звукоизолирующую способность оценены и проанализированы с помощью многофакторных ЭС - моделей, построенных на экспериментальных данных. Модели были использованы в вычислительных экспериментах, которые позволили извлечь скрытую в экспериментальных данных информацию о связи между свойствами материала и составом. В результате определены оптимально компромиссные составы, обеспечивающие получение достаточно легкого, тепло-, звукоизолирующего гипсобетона при соблюдении требований по прочности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Керш В.Я., Холдаева М.И., Керш Д.В. Метод оценки теплоизолирующих свойств теплоизоляционных покрытий. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник «НДІБМВ» «ДНДІСТ» – Випуск 40. -2011. – С.100-102.
2. Керш В.Я., Ляшенко Т.В., Керш Д.В. Анализ влияния легких заполнителей на звукоизолирующие свойства гипсобетона. Вісник ОДАБА, вип. № 46, Одеса, 2011р., с.164-168.
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (максимизация прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурса). – Современное промышленное и гражданское строительство. – 2007, т. 3, №1. – С. 5-15.
4. Lyashenko T., Voznesensky V. Compromise optimisation of slag alkaline binders with computational materials science methods. Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization. Proc. Int. Conf. Prague, CRA, 2007. – P. 447-458.