

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А. П. ПИЧУГИН, д. т. н., профессор,  
В. Ф. ХРИТАНКОВ, д. т. н., профессор,  
Е. Г. ПИМЕНОВ, аспирант,  
М. А. ПОДОЛЬСКИЙ, аспирант

***Строительство в климатических условиях Сибири имеет ряд специфических особенностей: низкая удельная капиталоемкость на единицу площади, рассредоточенность объектов, возведение преимущественно малоэтажных объектов, низкий уровень инженерного и технического обеспечения, отсутствие хороших дорог и коммуникаций, удаленность от баз стройиндустрии и др. Это вызывает необходимость широкого использования местных материалов и вторичных сырьевых ресурсов, а также поиска новых эффективных проектных, технологических и конструктивных решений.***

Поставленная задача усугубляется постоянным дефицитом стеновых строительных материалов с улучшенными теплотехническими и шумопоглощающими показателями, что является весьма актуальным в свете изменения нормативов и предъявляемых требований к ограждающим конструкциям. Кроме того, на этой обширной территории слабо развита промышленность стеновых строительных материалов, хотя часть страны, включающая в себя края, области и автономные республики, занимает площадь около 10 млн кв. км, что составляет больше половины территории России и больше европейского континента. В данном регионе проживает более 20 млн человек с различной степенью расселения по площади [1, 3].

Континентальный климат Сибири формируется под воздействием воздушных масс преимущественно арктического происхождения. Зима здесь долгая, с неустойчивой погодой. Средняя температура января — около  $-20^{\circ}\text{C}$ , но бывают морозы до минус  $45-50^{\circ}\text{C}$ . Зимой выпадает около 100–150 мм осадков. Снежный покров, как правило, не более 20–40 см, поэтому грунт глубоко промерзает. Лето теплое, но короткое — около 3 месяцев. Средняя температура —  $+18-22^{\circ}\text{C}$ , максимальная — выше  $40^{\circ}\text{C}$ . Период без заморозков составляет не более 2–3 месяцев. Относительная влажность воздуха летом и зимой — около 100%, что способствует интенсивному накоплению влаги в массиве ограждающих конструкций без возможности осушения в летний период из-за чрезмерно короткого теплого периода сухого воздуха [1].

Все это способствует повышению параметров коррозионной агрессивности атмосферы, которая характеризуется продолжительным (2 020–2 580 ч./год) увлажнением поверхностей пленками влаги, а также продолжительным увлажнением фазовой и адсорбционной пленками влаги, величина которых составляет соответственно 1 340–1 690 и 710–1 430 ч./год.

Однако строительство новых, реконструкция и ремонт существующих зданий и сооружений в Сибири и на Дальнем Востоке сопряжены с целым комплексом специфических особенностей, затрудняющих их выполнение. К ним относятся: продолжительная зима с низкими температурами наружного воздуха, сильными порывистыми ветрами, высокой снеговой нагрузкой и снегопадами, неустойчивое короткое лето с дождями и ливнями, с повышенной влажностью наружного воздуха и иногда заморозками, распространение заболоченных мест и территорий с высоким уровнем грунтовых вод и просадочными грунтами; а также слабое развитие сети круглогодичных транспортных путей и дорог с твердым покрытием, большая протяженность территории, дефицит трудовых ресурсов, текучесть кадров, неравномерность размещения материально-технической базы строительства [3, 4].

Влияние физико-географических факторов на строительные проектные решения выражается в повышенной массивности и материалоемкости ограждающих конструкций, в разработке специальных мероприятий по заглублению инженерных сетей и коммуникаций для предотвращения их промерзания, в максимальной блокировке зданий и сооружений, в организации целого набора конструктивных решений фундаментов, стен, полов, покрытий и других элементов зданий. Все это приводит к увеличению сметной стоимости объектов, которая и так значительно превышает аналоги для европейской территории страны ввиду более высоких отпускных и сметных цен на основные строительные материалы и изделия.

Кроме вышеперечисленных факторов, усугубляющим является непосредственное возведение объектов, которое ввиду суровых климатических условий, как правило, осуществляется сезонно, сезонными бригадами, с низким качеством работ, с заменой одних материалов другими, с нарушением технологической и производственной дисциплины.

Приведенные выше факты свидетельствуют о сложных условиях развития строительного комплекса Сибири и Дальнего Востока, о специфике природных, климатических и экономических особенностей этого региона.

Актуальной проблемой строительного-технологического комплекса Сибири является снижение материалоемкости строительства, внедрение эффективных пористых материалов и изделий для ограждающих конструкций, улучшение теплотехнических и эксплуатационных параметров зданий и сооружений с целью экономии энергоресурсов. Современное индивидуальное и коттеджное строительство в большинстве своем базируется на максимальном применении местных строительных материалов и вторичных сырьевых ресурсов, что экономически целесообразно и является наиболее рациональным направлением развития собственной базы.

Однако данные стеновые материалы не всегда удовлетворяют теплотехническим и акустическим требованиям, что требует дополнительных технических решений по данному вопросу. Эффективным направлением современного строительства является устройство навесных фасадных систем, включающих

в себя теплоизоляцию и защитную функции. Устройство таких навесных фасадов при возведении новых зданий получило достаточно широкое распространение и технологически отработано, но требует дополнительных существенных затрат на теплоизоляционную защиту и конструктивные элементы. Учитывая суровые климатические условия Сибирского региона и интенсивный износ стеновых материалов в период эксплуатации, для данных объектов требуется проведение отдельных исследований и выработки соответствующих рекомендаций с целью обеспечения надежной работы всех систем на весь расчетный период эксплуатации зданий.

Ограждения, возводимые из мелкоштучных изделий, имеют высокую плотность, снижающую теплотехнические параметры стеновых ограждений, и не обладают достаточными шумопоглощающими характеристиками, что так важно в современном мире. К недостаткам каменной кладки стен можно отнести низкие теплофизические характеристики, в результате чего ограждающие конструкции имеют повышенную массивность и, следовательно, высокую стоимость. Устраиваемые в каменной кладке теплоизоляционные вставки из пенопласта и других высокоэффективных теплоизоляционных материалов не всегда решают поставленные задачи вследствие интенсивного конденсатообразования на границе контакта материалов с резко отличающимися коэффициентами теплопроводности.

Устранение всех этих недостатков стен из кирпича может быть реализовано при производстве крупноразмерных блоков и панелей, позволяющем осуществлять монтаж зданий индустриальными способами. Но при всех достоинствах и преимуществах отработанных технологий и они не лишены явных недостатков по теплофизическим и акустическим показателям. На наш взгляд, более прогрессивная концепция технологии производства стеновых материалов должна обеспечивать при высоких прочностных и эксплуатационных параметрах повышенные показатели тепловой защиты и иметь хорошие звукопоглощающие свойства. Такая технология принципиально отличается от ранее существовавших подходов при формировании изделий из однородной массы и базируется на получении интегральной крупнопористой структуры материала.

Разработаны теоретические положения формирования легких бетонов на крупном пористом заполнителе с изменяемой структурой пор, эффективно снижающих шумы одновременно на низких, средних и высоких звуковых частотах за счет направленно изменяемой пористой структуры и обладающих при этом высокими теплотехническими свойствами. Установлена возможность регулирования звукопоглощающих свойств материалов стеновых ограждений путем формирования структуры материала с направленно изменяемой величиной пор в крупнопористом легком бетоне и оптимизации соотношения составляющих в крупном заполнителе [2–5].

Для формирования интегральной структуры легкого бетона необходимо предварительно осуществить оценку качества исходных материалов, а при необходимости произвести определенные технологические операции по улучшению характеристик сырья — крупного и мелкого заполнителя: гранулометрический состав, водопоглощение, удельная поверхность зерен, пыленность и химические особенности минеральных или органоминеральных частиц, адгезионные и когезионные показатели. Наибольшее влияние на качественные характеристики бетона, в том числе и легкого бетона, оказывают: вид и свойства минерального вяжущего, толщина клевого шва между гранулами заполнителя, степень активности или инертности заполнителя. Однако следует при этом иметь в виду, что толщина слоя цементного теста между частицами крупного заполнителя не должна иметь излишнюю величину во избежание увеличения плотности легкого бетона.

Определение оптимальной толщины пленки вяжущего, обуславливающей максимальную прочность, проводилось нами на цементно-водных композициях различной вязкости для установления эталонного состава по каждому виду крупного заполнителя. Из приготовленных составов формовались образцы различной формы: кубики, балочки, восьмерки и др. Кроме цементно-водных составов, готовились цементно-водные композиции с различной степенью наполнения, для

которых также определялись все характеристики и выявлялись оптимальные составы для каждой толщины связующей пленки минерального вяжущего. Установлено, что оптимальные толщины пленки вяжущего вокруг зерен (гранул) заполнителя соответствуют максимальной прочности цементно-водного вяжущего. Кроме того, для каждого вида крупного заполнителя и для каждого соотношения компонентов вяжущего существует строго определенная толщина пленки, обеспечивающая максимальную прочность минеральной связки. Увеличение или уменьшение толщины приводит к падению прочности вяжущего из цементно-водной композиции. Оптимальная толщина минерального вяжущего определяется не только соотношением «вода : цемент», но и видом заполнителя.

Зная закономерность изменения прочности в зависимости от степени соотношения компонентов, вязкости цементно-водных систем, можно определить математическую зависимость этих величин и дать расчетную формулу для определения минимально необходимого количества вяжущего при составлении рецептуры того или иного состава.

Исходя из экспериментальных данных, толщина пленки может быть рассчитана по формулам, приведенным в работе [4]:

$$\delta = \frac{V_{св} \times \eta_{усл}}{S_3 \times m_3}, \quad (1)$$

где:  $\delta$  — толщина пленки вяжущего, м;  $V_{св}$  — объем вяжущего, м<sup>3</sup>;  $S_3$  — удельная поверхность заполнителя, м<sup>2</sup>/кг;  $m_3$  — масса заполнителя, кг;  $\eta_{усл}$  — отношение фактической вязкости цементно-водной композиции к вязкости эталонной композиции.

После преобразования формула 1 примет более удобную и простую форму:

$$\delta = \frac{m_6 \times \eta_{усл}}{S_3 \times m_3 \times \rho_6}, \quad (2)$$

где:  $m_6$  — масса вяжущей композиции, кг;  $\rho_6$  — плотность вяжущей композиции, кг/м<sup>3</sup>.

Расчеты показывают, что для оптимальных составов цементно-водных композиций средняя приведенная толщина пленки вяжущего вокруг каждой гранулы заполнителя составляет 0,001–0,003 м, а общая толщина цементного камня колеблется в пределах 0,003–0,008 м.

Расход цементно-водного вяжущего для любого объема крупнопористого бетона рассчитывается по формуле:

$$G_{ц.в.} = \frac{S_3 \times m_3 \times \rho_6 \times \delta \times \eta_{усл}}{1000}, \quad (3)$$

где:  $G_{ц.в.}$  — оптимальный расход вяжущего, кг;  $S_3$  — удельная поверхность заполнителя, м<sup>2</sup>/кг;  $m_3$  — масса заполнителя, кг;  $\rho_6$  — плотность вяжущей композиции, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  — толщина пленки вяжущего на грануле заполнителя, м.

Расчеты количества вяжущего по формуле 3 показывают, что для каждого вида минерального или органического крупного заполнителя существуют свои оптимальные соотношения по расходу вяжущего, характеристикам вязкости и прочности. Такие составы обладают максимальной адгезией, жесткостью и прочностью.

Для полигранулометрического состава сухой смеси количество цементно-водного вяжущего может быть определено по формуле:

$$G_{ц.в.} = \frac{K(S_1 m_1 + S_2 m_2 + \dots + S_n m_n) \rho_{св} \delta \eta_{усл}}{1000}, \quad (4)$$

где:  $G_{ц.в.}$  — оптимальный расход вяжущего, кг;  $S_1, S_2, \dots, S_n$  — удельная поверхность заполнителя различных фракций, м<sup>2</sup>/кг;  $m_1, m_2, \dots, m_n$  — масса заполнителя различных фракций, кг;  $K$  — коэффициент раздвижки зерен, необходимый для смачивания или обволакивания гранул заполнителя, принимается  $K = 1,05 - 1,15$ .

Удельную поверхность заполнителей можно вычислить по ситовому анализу, используя следующую формулу:

$$S_{уд.к} = 0,06 \left( \alpha_1 \frac{q_1}{\rho_{щ1}} K_1 + \alpha_2 \frac{q_2}{\rho_{щ2}} K_2 + \alpha_3 \frac{q_3}{\rho_{щ3}} K_3 + \alpha_4 \frac{q_4}{\rho_{щ4}} K_4 + \alpha_5 \frac{q_5}{\rho_{щ5}} K_5 \right), \quad (5)$$

где:  $S_{уд.к}$  — удельная поверхность крупного заполнителя различных фракций, соответственно, м<sup>2</sup>/кг;  $\alpha$  — пустотность заполнителей;  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  — остаток заполнителя (кг) на ситах с отверстиями соответственно 5, 10, 20 и 40 мм для щебня (гравия);  $\rho_{щ}$  — плотность щебня (гравия), кг/м<sup>3</sup>;  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  — соответственные коэффициенты геометрической формы заполнителей.

Таким образом, зная удельную поверхность заполнителей, количество вяжущего для бетонов оптимального состава определяются по формуле (4). В нашем случае определение расходов минерального вяжущего осуществлялось для каждого фракционного состава.

Структура бетона с интегральным расположением крупного заполнителя существенно отличается от обычных конгломератов, но может быть представлена как единичный элемент крупнопористого бетона в каждой конкретной точке массива бетона (фото 1). Однако при этом необходимо учитывать тот факт, что каждый рядом располагающийся слой отличается от среднего и крайних слоев не только диаметром гранул крупного заполнителя, но и плотностью, следовательно, теплофизическими и акустическими показателями.

Процедура расчета и проектирования легкогобетонной смеси состоит из следующих последовательных этапов и операций.

1. Расчет цементно-водного отношения, обеспечивающего заданную прочность бетона, осуществляется по вышеприведенным формулам.
2. При повышенных требованиях к долговечности бетона или при необходимости высокой удобоукладываемости смеси без расслоения можно использовать пластифицирующие добавки.
3. Подбирается контрольное отношение по формулам в зависимости от применяемого оборудования и уровня технического контроля.
4. При применении добавок контрольное отношение умножается на коэффициент, приведенный в рекомендациях по использованию данных добавок.
5. Производится разделение цементно-водного отношения, выбранного по контрольному соотношению для получения среднего цементно-водного отношения, которое учитывает изменения и погрешности при приготовлении бетонной смеси.
6. Определяются остатки на ситах соответственно крупного заполнителя по различным фракциям и подсчитываются для определения расходов составляющих.

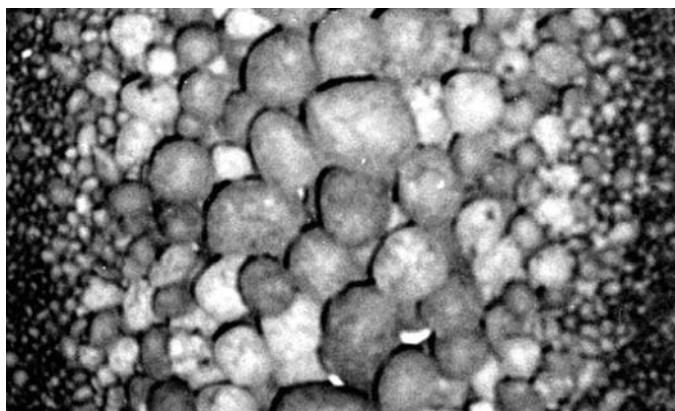


Фото 1. Формирование стенового блока с направленно изменяемой пористой структурой легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя

7. Подсчитывается коэффициент геометрической формы заполнителей для каждой фракции и значения плотности крупного заполнителя в насыпном состоянии и показатели его истинной плотности.

8. Определяется содержание крупного заполнителя для каждой фракции.

9. Подбирается значение требуемой удобоукладываемости (время Вебе) для заданных условий укладки бетона.

10. Осуществляется корректировка составов, если это необходимо, в зависимости от типа цемента и крупного заполнителя, а также заданной плотности и прочности крупнопористого бетона.

11. Суммарный или интегральный состав бетона по массе на 1 м<sup>3</sup> ограждения находится непосредственно из объемных частей и соответствующих значений плотности слоев и их составляющих.

В каждом конкретном случае расчет может быть представлен по аналогии с крупнопористым бетоном [2–4], т. е. определяется расчетным путем исходный состав бетона без приготовления первого опытного замеса; приготавливается на сухом заполнителе опытный замес с различным расходом цемента, воды, с последующим формованием контрольных кубов размером 0,15 x 0,15 x 0,15 м для определения плотности и прочности бетона на каждой фракции; после испытания кубов на основании полученных данных выбирается оптимальный расход цемента бетона требуемой прочности и средней плотности с выдачей рекомендаций на производство рабочего состава бетонной смеси с учетом влажности заполнителя.

Далее была разработана технологическая схема производства, подобрано соответствующее оборудование и изготовлены специальные устройства для раздельного послойного формования блоков. В условиях реального производства было отформовано нескольких партий стеновых блоков (фото 2, 3).

Ниже приводятся средние физико-технические характеристики материала легкогобетонных блоков, в которых в качестве заполнителя вводился керамзитовый гравий, предварительно разделенный на фракции 5–10, 10–20, 20–40 мм.

Предел прочности при сжатии — 2,5–7,5 МПа.

Средняя плотность — 450–720 кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопроводности — 0,12–0,30 Вт/(м °С).

Морозостойкость — 35–50 циклов.

Водопоглощение — 25–32%.

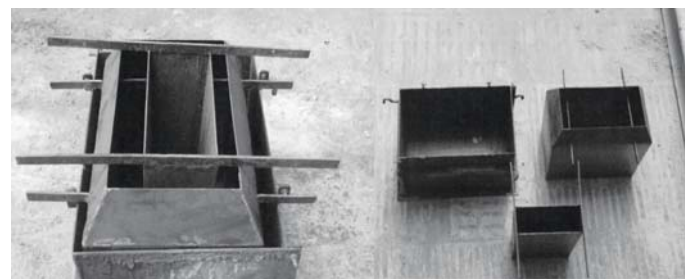


Фото 2. Специальная форма для раздельного пофракционного формования блоков из легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя



Фото 3. Стеновые блоки из легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя в цехе завода железобетонных изделий (г. Куйбышев, Новосибирская обл.)

Звукопоглощающая способность легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя

Наименование материала (фракции)	Коэффициент звукопоглощения при частоте звука							
	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц
Керамзитобетон традиционный	0,03	0,04	0,06	0,06	0,08	0,12	0,14	0,16
Керамзитобетон на гранулах фракции:								
	5–10 мм	0,08	0,12	0,11	0,18	0,27	0,38	0,44
	10–20 мм	0,10	0,14	0,18	0,23	0,24	0,32	0,45
20–40 мм	0,11	0,13	0,16	0,22	0,23	0,34	0,49	0,52
Шлакобетон на гранулах фракции:								
	5–10 мм	0,06	0,11	0,10	0,17	0,25	0,36	0,39
	10–20 мм	0,11	0,12	0,16	0,21	0,23	0,31	0,44
20–40 мм	0,10	0,11	0,14	0,20	0,22	0,33	0,49	0,54
Керамзитшлакобетон на гранулах фракции:								
	5–10 мм	0,12	0,15	0,18	0,19	0,29	0,41	0,45
	10–20 мм	0,16	0,17	0,23	0,28	0,32	0,32	0,45
20–40 мм	0,21	0,23	0,26	0,32	0,37	0,36	0,54	0,56

Для уточнения и отработки рецептурно-технологических параметров были изготовлены специальные лабораторные установки со звуковыми генераторами, трубами различной длины с внутренней изоляцией, осциллографами с цифровым считывающим устройством для проведения исследований по определению звукопоглощающей способности легких бетонов с направленно изменяемой пористой структурой. Для исследования звуковых волн в коротком диапазоне длин — диаметром 0,26 м при длине 1 м; для звуковых волн средних длин — диаметром 0,10 м при длине 1 м; для больших длин волн — диаметром 0,26 м длиной 7 м. Все трубы тщательно изолировались от внешних источников шума. Результаты исследований приведены в таблице.

Более детальное изучение свойств легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя показало не только хорошие теплофизические характеристики материала, особенно для средних слоев крупнопористого бетона, но и его исключительно высокие показатели звукопоглощения. Отличительными особенностями предлагаемой технологии получения легкобетонных блоков является тот факт, что данные материалы для стен обладают значительно меньшими показателями теплопроводности по сравнению с обычными легкими бетонами: среднее значение 0,20–0,22 против 0,40–0,45 Вт/(м·°С). Коэффициент звукового поглощения во всем диапазоне звуковых волн в три-пять раз выше по сравнению с традиционным керамзитобетоном (см. таблицу). Такие свойства свидетельствуют о высокой энергосберегающей способности предлагаемой технологии. Кроме того, выяснилось, что комбинированные легкие заполнители с различной пористой структурой более эффективны и имеют повышенные эксплуатационные показатели.

Разработаны составы бетона и технология изготовления легкобетонных стен на крупных заполнителях с высокими коэффициентами поглощения шума в широком диапазоне звуковых частот и хорошими физико-механическими показателями. Разработана методика расчетной и экспериментальной оценки шумопоглощающих характеристик легких крупнопористых бетонов

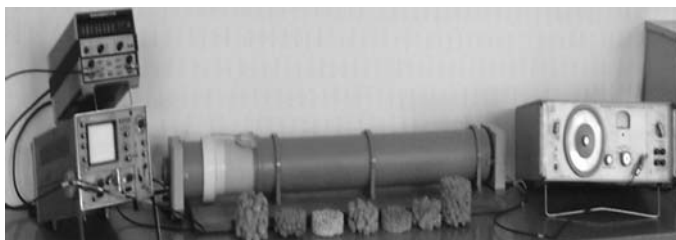


Фото 4. Установка для исследования звуковых волн средних длин — диаметром 0,10 м при длине 1 м

с интегральным расположением крупного заполнителя, что позволяет направленно проектировать и изготавливать материалы с заданной структурой и шумопоглощающими свойствами. Предложены составы легких бетонов классов В 3,5, В 5,0 с различными минеральными и органическими заполнителями, имеющие прочность при сжатии 2,5–5,0 МПа, коэффициент теплопроводности 0,14–0,31 Вт/(м·°С) и повышенные звукопоглощающие свойства за счет формирования структуры материала с направленно изменяемой пористостью. Разработаны монолитная и заводская технологии получения легкобетонных стеновых блоков и крупнопористых стен с интегральным расположением крупного заполнителя. Подготовлены и утверждены Временные технические условия и Рекомендации по изготовлению легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя и улучшенными теплофизическими и акустическими показателями.

Разработанные материалы и технологические процессы внедрены при строительстве жилых и хозяйственных зданий в Куйбышевском, Чановском, Барабинском районах Новосибирской области.

Наблюдение за состоянием эксплуатируемых объектов показало высокие эксплуатационные показатели легкого бетона с интегральным расположением крупного заполнителя, обеспечивающим формирование направленно изменяемой пористой структуры, а также высокую экономическую эффективность от их использования. Таким образом, данная технология получения стеновых материалов может быть признана как высокоэффективная или энергоэффективная по теплофизическим показателям и шумопоглощающей способности.

#### Литература

1. Пичугин А. П., Денисов А. С., Хританков В. Ф. «Экологические проблемы эффективного использования отходов и местного сырья в строительстве». // «Строительные материалы», №3, 2005 г.
2. Пичугин А. П., Денисов А. С., Хританков В. Ф., Авраменко В. В. «Звукопоглощающий легкий бетон». Патент на изобретение №2415824 с приоритетом от 26.05.2009 г.
3. Денисов А. С. «Легкие бетоны с изменяемой гранулометрией пористого заполнителя для стен зданий, работающих в суровых климатических условиях». Автореферат, дис. на соиск. ученой степени доктора техн. наук. Новосибирск, 2007 г.
4. Хританков В. Ф. «Легкие органоминеральные бетоны с повышенной звукопоглощающей способностью». // «Строительные материалы», №8, 2009 г.
5. Пичугин А. П., Денисов А. С., Хританков В. Ф., Бареев В. И. «Прогрессивная концепция формирования стеновых блоков из легкого бетона на обжиговой связке». // «Строительные материалы», №12, 2011 г. □