

УДК 666.973.6

*Сажнев Н.П., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, помощник руководителя
ОАО «Управляющая компания холдинга «Забудова»
Республика Беларусь. г. Чисть*

*Сажнев Н.Н., зам. директора. по кап. строительству,
СЗАО «КвариМелПром», Республика Беларусь,
г. Малорита*

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ УДАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Под энергоемкостью подразумевается совокупность энергозатрат на производство, транспортировку, укладку, эксплуатацию в течение жизненного цикла материала. Очевидно, что материал должен изготавливаться из местных, доступных и экологически чистых сырьевых материалов.

Энергосберегающая технология ячеистобетонных изделий должна базироваться на реализации следующих направлений: снижении средней плотности материала без существенного падения прочности; уменьшении водотвердого отношения за счет использования динамических воздействий и разжижающих добавок; уменьшении расхода энергоемких вяжущих (цемента, извести); снижении дисперсности кремнеземистого компонента. При этом должна быть обеспечена высокая долговечность и эксплуатационная стойкость изделий.

Для уменьшения усадки, ползучести и повышения трещиностойкости изделий, дисперсность кремнеземистого компонента и расход вяжущего должны быть максимально снижены, но без ущерба для прочности ячеистого бетона [1].

Затраты энергии на автоклавную обработку изделий прямо пропорциональны массе твердых компонентов и воды затворения: на нагрев каждого 1 кг затрачивается соответственно 168 и 764 кДж теплоты. Велики затраты электроэнергии на помол компонентов смеси: на измельчение 1 кг песка до 1500-3000 см²/г затрачивается соответственно 123 и 302 кДж электроэнергии [2].

Анализ производств ячеистобетонных изделий по традиционной, так называемой литьевой технологии (особенно зарубежных фирм, достигших сравнительно высоких технико-экономических показателей) свидетельствует о том, что из-за большого количества воды затворения используются смеси с повышенным (до 40% массы сухих компонентов) расходом вяжущих материалов (цемент и известь), высокой тонкостью помола песка (3000-3500 см²/г) и цемента (3500-4000 см²/г). При этом требуются большие затраты на автоклавную обработку (давление 1,2-1,4 МПа, продолжительность 12-14 ч) и очень высокое качество всех исходных материалов. Производство ячеистобетонных изделий характеризуется большой продолжительностью выдержки сырца до разрезки (3-5 ч), значительной влажностью изделий после автоклавной обработки, равной 30-35% по массе и порой низкой их морозостойкостью.

Рассматривая межпоровый материал ячеистого бетона (микроструктура) с позиции основных законов бетоноведения, приходим к выводу об отрицательном влиянии на его свойства избыточного количества воды затворения. Например, В. Рейман [3] предложил прочность автоклавного бетона (R_c) выражать через гидросиликатноводное отношение:

$$R_c = a \frac{H}{B} + b \quad (1)$$

где H и B — количество гидросиликатов кальция и воды затворения; a , b — константы.

Формирование макроструктуры (ячеистой структуры) газобетона определяется двумя обобщающими (для литьевой и ударной технологий) характеристиками: объемом образующегося газа и реологическими свойствами раствора, кинетика изменения которых во времени зависит от исходного состояния смеси: щелочности, вязкости, температуры, газообразующей способности раствора и от интенсивности динамических воздействий в процессе формования (вспучивания).

При литьевой технологии процесс вспучивания смеси определяется только качеством и количеством исходных компонентов, и поэтому подбор исходного ее состояния является пассивным управлением процессом формования. Использование динамических воздействий позволяет регулировать этот процесс с учетом изменения реологических свойств смеси.

Известно, если во время формования вязкость ячеистобетонной смеси ниже оптимальной, то нарушается баланс газовой фазы: газообразователь полностью не используется, и происходит недовспучивание или осадка смеси. Отклонения вязкости смеси от оптимальной в обоих случаях приводят к разрушению микроструктуры и низкому качеству бетона.

Известно, прочность межпорового материала ячеистого бетона растет с уменьшением количества воды затворения или $(V/T - \text{отношение количества воды затворения к твердому (T) веществу смеси})$ и теоретически нижний предел оценивается 10-15% массы воды от общей массы вещества $V/(V+T)$, т.е. соответствующей количеству воды, необходимой для протекания гидратации и кристаллизации вяжущего. На рисунке 1 приведена возможная зависимость прочности межпорового вещества (1) и прочности ячеистого бетона (2) от $V/(V+T)$.

Из рисунка 1 видно, что для повышения прочности бетона необходимо сближение экстремумов кривых 1 и 2 на оси $V/(V+T)$. Переместить максимум кривой 1 вправо, как уже отмечалось, нецелесообразно, а кривой 2 влево можно, создав в высоковязкой смеси оптимальные реологические характеристики для формирования макроструктуры за счет тиксотропного разжижения смеси.

Воду затворения можно разделить на три части:

V_1 — химически связанная вода, необходимая для гидратации вяжущего;

V_2 — физически связанная вода, адсорбированная твердыми компонентами смеси благодаря дипольному взаимодействию;

V_3 — свободная балластная вода.

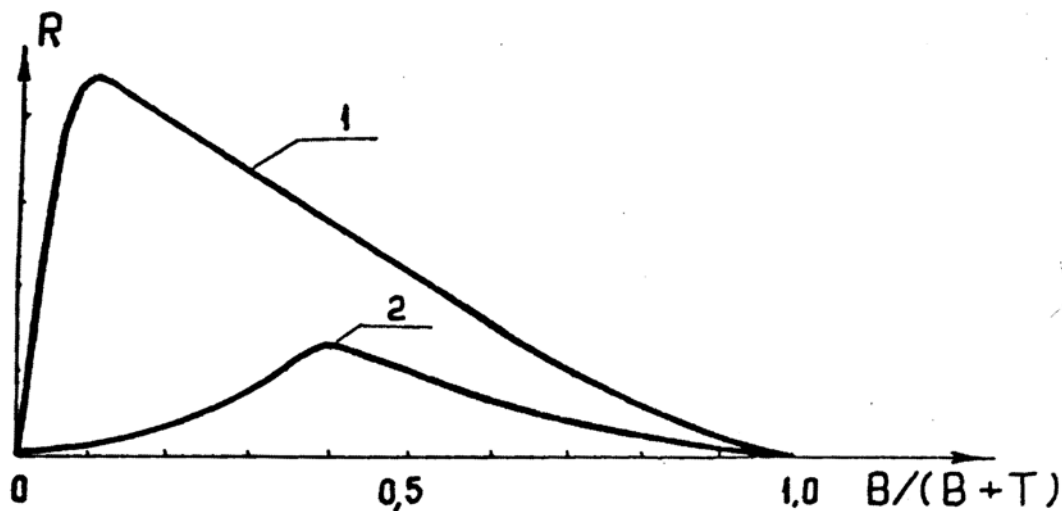


Рисунок 1 - Зависимость прочности от количества воды затворения

1 — прочность межпорового вещества;

2 — прочность ячеистого бетона при постоянной объемной массе

После затворения смеси количество V_1 непрерывно увеличивается за счет поступлений из V_2 , а V_2 восполняет свои запасы за счет V_3 . Уменьшение количества V_3 происходит также из-за адсорбции воды жидкостными оболочками газовых пузырьков. Вязкость смеси определяется, при прочих равных условиях, количеством V_3 , поэтому общее снижение V_3 приводит к повышению вязкости смеси. Для нормального протекания процесса вспучивания смеси необходимо обеспечить оптимальную вязкость, в данном случае понизить ее, например, за счет тиксотропного разжижения смеси.

Явление тиксотропии заключается в разрушении слабых коагуляционных структур с помощью динамических воздействий и в переводе заземленной (иммобилизованной) и частично адсорбированной воды в свободное состояние. Здесь следует отметить, что дополнительно можно сдвинуть экстремум кривой 2 влево (рис. 1) за счет интенсивного перемешивания и использования сильных ПАВ.

Кроме того, динамические воздействия в начале процесса гидратации вяжущих материалов разрушают коагуляционную структуру, разжижают смесь, а позднее обеспечивают уплотнение межпорового вещества, содействуют преодолению энергетического барьера между частицами и способствуют образованию рациональной макро и микро структуры ячеистого бетона.

В результате вибрационных (ударных) воздействий происходит уплотнение межпоровых перегородок. Вода из них выжимается в воздушные полости на границу раздела газ – материал. Доля крупных капилляров сокращается более чем в двое при низком В/Т [4].

В НИПИ силикатобетона, НПО «Силбет» (г. Таллинн) в 1976-1995 гг. совместно с Рижским политехническим институтом, Московским инженерно-строительным институтом, ВНПО «ВНИИСТРОМ», Всесоюзным заочным инженерно-строительным институтом (г. Москва), НИИГИПРОСТРОМмашина (г. Киев) и Минским институтом строительных материалов проводились научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по исследованию и созданию ударной технологии производства ячеистобетонных изделий и разработке устройств для формования (ударных площадок). Патенты РФ: № 669588 «Способ изготовления изделий из ячеистобетонной смеси»; № 1058187 «Способ изготовления ячеистобетонных изделий»; № 1081967 «Способ изготовления изделий из ячеистобетонной смеси»; № 1049250 «Устройство для формования ячеистобетонных изделий».

Принципиально новое направление производства изделий из ячеистых бетонов базируется на использовании в качестве динамических воздействий для разжижения смеси удара, более эффективного, чем вибрация, на колебаниях ячеистобетонной смеси на основной собственной частоте и на эффекте остаточной тиксотропии, что обеспечивает получение высококачественной макро и микро структуры ячеистого бетона.

Проведенные исследования основных закономерностей ударного способа формования, в том числе экспериментальное определение структурно-механических и акустических параметров смеси, убедительно подтвердили правильность выбора нового способа изготовления ячеистого бетона и устройств для формования [5, 6, 7].

Сравнительная оценка качества макро структуры ячеистого бетона, полученного по ударной технологии, показывает, что оно находится на уровне, соответствующем структуре бетона, например, фирмы «Сипорекс» (литьевая технология). Макроструктура равномерна, без расслоений и трещин. Например, относительное количество ячеек с дефектными простенками межпорового материала в бетоне «Сипорекс» равно 7,0, а в бетоне, полученном по ударной технологии, — 6,0 и в бетоне, изготовленном по вибротехнологии — 14,2.

Показатель изотропности и бездефектности ячеистой структуры бетона (K_g), изготовленного по ударной технологии, равен 0,66. Средняя величина K_g для бетона «Сипорекс» — 0,64. Это можно объяснить повышением качества макро структуры и уплотнением пор в материале.

На рис. 2 в качестве сравнительного примера показана макро структура ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии, и на рис. 3 — ячеистого бетона фирмы «Сипорекс».

Коэффициент равноосности ячеек (средняя округлость ячеек), который наиболее четко характеризует качество макроструктуры бетона, особенно при вертикально направленном динамическом воздействии, совпадающим с направлением движения газовых пузырьков и вспучивания смеси, в обоих случаях находится в пределах 0,85—0,87.

Известно, что прочностные и особенно эксплуатационные свойства ячеистого бетона связаны со структурой межпорового пространства главным образом распределением капиллярных пор по размерам. Поэтому было изучено распределение пор в радиусе более 50 и менее 0,01 мкм, характеризующее состояние микроструктуры ($r < 0,01$ мкм), от 0,01 до 0,1 мкм (состояние переходных пор) и от 0,1 до 50 мкм (состояние более мелкой части макропор).

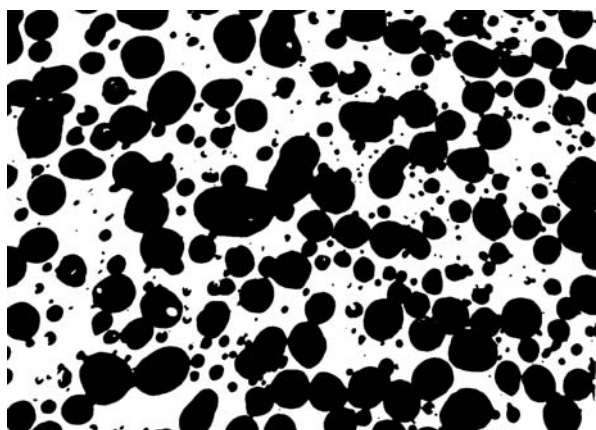


Рисунок 2 - Макроструктура ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии

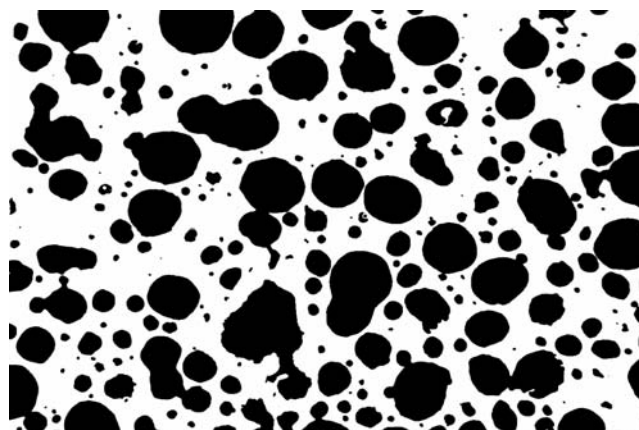


Рисунок 3 - Макроструктура ячеистого бетона шведской фирмы «Сипорекс»

Установлено, что независимо от способа формования смеси (ударная или литевая технология), вида вяжущего (смешанное или сланцезольное) общая пористость ячеистого бетона изменяется в пределах 68,7-79,9%, а объем капиллярных пор радиусом не менее 0,01-50 мкм колеблется в пределах 361,3-562,5 мм³/г, возрастая для материалов с пониженной плотностью за счет увеличения переходных пор в интервале радиусов 0,1-0,01 мкм. Объем этих пор, обладающих высокой удельной поверхностью, составляет 11,5-27,4 м²/г для образцов ячеистого бетона ударной технологии, 39,9-51,4% против 57,7-62,6% — для ячеистого бетона литевой технологии и 60,9% — для ячеистого бетона «Сипорекс» (табл. 1).

Анализ показал, что для получения повышенной прочности ячеистого бетона необходимо стремиться к уменьшению объема пор радиусом 0,1-0,01 мкм (как при использовании ударной технологии). Максимальную прочность имели образцы ячеистого бетона, водопоглощение которых изменялось в пределах 30,2-33,2%, а объем переходных пор ($r = 0,01-0,1$ мкм) составлял 165-225 мм³/г (табл. 2).

Установлено, что при одной и той же плотности в зависимости от величины объема, образованного порами радиусом 0,1-0,01 мкм, морозостойкость изменяется в широких пределах, повышаясь с увеличением плотности. При плотности материала около 500 кг/м³ максимум морозостойкости (≈ 45 циклов) приходится на цементирующую связку, в которой объем переходных пор радиусом 0,1-0,01 мкм составляет около 200-250 мм³/г (табл. 2). Морозостойкость не менее 40 циклов имеет ячеистый бетон при водопоглощении не более 34% и объеме пор радиусом 0,1-0,01 мкм — 200-225 мм³/г.

Таблица 1 - Характеристика макроструктуры ячеистого бетона

Технология и вид вяжущего	Плотность, кг/м ³	Объем пор, мм ³ /г, радиус, мкм					Удельная поверхность пор, м ² /г, радиус, мкм				
		50-10	10-1	1-0,1	0,1-0,01	<0,01	Общий объем	0,1	0,1-0,01	<0,01	Общая удельная поверхность
Ударная (смешанное вяжущее – цемент и известь)	532	299	52,6	39,8	244,9	16,2	$\frac{562,53}{39,98}$	0,4	20,4	3,6	24,4
	—	242,1	28,3	29,9	177,1	33,2	$\frac{510,5}{34,7}$	0,2	14,5	6,8	21,5
	542	156,8	22,9	16,6	182,8	16,8	$\frac{395,9}{46,2}$	0,2	17,5	3,8	21,5
	472	127,2	52,4	20,9	178,9	39,9	$\frac{419,3}{42,7}$	0,2	16	8,7	24,9
	507	150,6	38,7	18,1	196,8	42,8	$\frac{446,9}{44}$	0,1	18,5	9	28,2
	365	130,2	15,4	45,8	295,9	28,4	$\frac{515,1}{51,4}$	0,3	27,4	6,1	33,8
Литьевая, фирмы «Сипорекс» (вяжущее – цемент)	469	127,6	36,7	15,3	324,4	28,9	$\frac{532,9}{60,9}$	0,2	26,9	6,3	33,4

Примечание: над чертой — общий объем пор радиусом < 0,01 до 50 мкм, мм³/г; под чертой — % пор радиусом 0,1—0,01 мкм от общего объема пор.

Таблица 2 - Зависимость морозостойкости ячеистого бетона от макроструктуры

Вяжущее	Технология	Общий объем пор, мм ³ /г	Объем пор радиусом 0,1-0,01 мкм, мм ³ /г	Водопоглощение, %	Плотность, кг/м ³	Морозостойкость, циклы (ГОСТ 12852—77)
Известково-цементное	Ударная	562,5	224,9	33,2	532	35
		446,9	196,8	32,9	507	35
		629,3	165,7	34,1	467	50
		575,0	295,9	44,8	365	25
	Литьевая (фирма «Сипорекс»)	532,9	324,4	45,7	469	Разрушились через 15

При одинаковой плотности, равной 467 кг/м³, ячеистый бетон, изготовленный по ударной технологии, имеет прочность при сжатии 4,23 МПа, а по литьевой — 3,86 МПа; водопоглощение составляет соответственно 34,1 и 45,7% (табл. 3).

Таким образом, использование динамического воздействия при формировании ячеистобетонной смеси приводит к перераспределению объема пор радиусом менее 0,01 и 50 мкм. Для ячеистого бетона, полученного по ударной технологии, по сравнению с литьевой, характерно снижение доли переходных пор радиусом 0,01-0,1 мкм при практически одинаковой

его плотности и возрастание объема пор радиусом 0,1-50 мкм, удельная поверхность которых не превышает 0,4 м²/г.

Таблица 3 - Зависимость физико-механических показателей бетона от технологии изготовления

Ячеистый бетон	В/Т	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, при изгибе, МПа	Динамический модуль упругости, МПа	Водопоглощение (открытая интегральная пористость), %	Водонасыщение (общая пористость), %
Ударная технология	0,32	532	3,7	1,34	1,86x10 ³	33,2	74,8
	0,34	542	4,0	0,99	1,62x10 ³	34,3	72,8
	0,38	467	4,23	1,42	1,97x10 ³	34,1	68,7
	0,40	507	3,45	1,27	1,52x10 ³	32,9	79,9
	0,41	508	4,8	1,31	2,07x10 ³	32,6	72,4
«Сипорекс» (литьевая технология)	0,59	468	3,86	1,25	1,61x10 ³	45,7	78,6

Преобладающим фактором, определяющим свойства ячеистого бетона по ударной или литьевой технологиям, является структура межпорового вещества (микроструктура), которая складывается из гидросиликатных новообразований, «склеивающих» непрореагировавшие частицы песка и вяжущего в одно целое, а также капиллярной пористости, пропорциональной начальному содержанию воды в ячеистобетонной смеси.

Гидросиликатные новообразования (гидросиликатная связка) представлены в основном смесью минералов тоберморитовой группы: 1,13 нм тоберморита, С-S-H(1) и С-S-H(II) с различной степенью конденсации силикатных анионов в их структуре. Общее содержание гидросиликатов кальция изменяется от 30 до 45%, в том числе 1,13 нм тоберморита от 15 до 30%.

Некоторые исследователи считают, что основное влияние на свойства силикатных автоклавных материалов, в том числе и ячеистого бетона, оказывает содержание 1,13 нм тоберморита в гидросиликатной связке. Имеется ряд публикаций (Тейлор, Моохер), касающихся очень прочных автоклавных силикатных материалов, которые вообще не содержат тоберморита, а Пуртон утверждает, что образование тоберморита явно вредит прочности.

Некоторые исследователи (Бесси, Пуртон, Пауэрс) доказали, что природа продуктов реакции имеет несущественное значение, гораздо важнее заполнение пространства. Пауэрс Т.К. [8] утверждает, что прочность цементного камня $R_{цк}$ связывается с объемной концентрацией продуктов гидратации в производстве, в котором размещаются эти продукты – с фактором «гель : производство X»:

$$R_{цк} = R_{цг} \cdot X^n, \quad (2)$$

где $R_{цг}$ – прочность цементного геля, X – отношение объема геля (продуктов гидратации) к сумме объемов геля и капиллярного пространства, определяемого количеством воды затворения; n – константа, характеризующая степень снижения прочности с уменьшением X.

Таким образом, принципиально следует стремиться к максимально возможному снижению капиллярной пористости и уменьшению размеров капилляр путем сокращения количества воды затворения. Как подтверждает формула Пауэрса, для того чтобы компенсировать

отрицательное влияние избыточного количества воды при литевой технологии, необходимо увеличивать концентрацию гидросиликатной связки, т.е. повышать расход вяжущих веществ и дисперсность песка.

По данным Меркина А.П. размер микропор влияет на форму кристаллов и характер новообразований в поризованных бетонах. При больших В/Т длинные и широкие ленточные и пластичные кристаллы свободно и самостоятельно растут в порах, заполняя их. В капиллярах, характерных для систем с низким В/Т и особенно для смесей с низкой удельной поверхностью кремнеземистого компонента (плотные мембраны), чешуйчатые новообразования и мелкие игольчатые кристаллы формируются на поверхности пор и непосредственно на зернах кварца. Таким образом, в случае малых В/Т можно говорить об омоноличивании системы новообразованиями [4]. Кроме того, как уже отмечалось ранее, использование ударных воздействий при изготовлении ячеистого бетона позволяет значительно интенсифицировать автоклавное твердение (ускорение синтеза) в результате ускорения диффузии ионов.

Поризованные материалы с повышенной плотностью твердой фазы мембраны более резко меняют свою плотность при варьировании длительности изотермической выдержки автоклавной обработки ($\tau_{\text{изот}}$) в интервале 2-12 ч. Прочность на сжатие ($R_{\text{сж}}$) при В/Т=0,63 плавно возрастает до $\tau_{\text{изот}} = 5-7$ ч, а затем также плавно падает. В материалах с В/Т 0,22 и 0,25 прирост $R_{\text{сж}}$ наблюдается лишь до $\tau_{\text{изот}} 3,0-3,5$ ч, затем наступает период стабилизации $R_{\text{сж}}$ и при дальнейшем увеличении $\tau_{\text{изот}}$ обнаруживается значительный сброс прочностных показателей [4].

Результаты проведенных исследований и практика их промышленного освоения позволили выявить основные закономерности ударной технологии производства ячеистого бетона при одновременной значительной экономии материальных и энергетических ресурсов.

Проведенные исследования позволили построить модели зависимостей прочности и плотности от технологических факторов и произвести поиск зон оптимума, что обеспечивает получение ячеистых бетонов плотностью не более 500 кг/м³, прочностью при сжатии не ниже 3,5 МПа при минимальном расходе сырьевых материалов и энергии для их помола.

Установлено, что при постоянных технологических параметрах изменение содержания цемента от 5 до 22 % почти не влияет на прочность бетона. Например, при одной и той же дисперсности песка или В/Т прочность увеличивается не более чем на 0,2-0,25 МПа (5-7%). В тоже время изменение других технологических параметров при одном и том же расходе цемента больше влияет на прочность бетона: с повышением В/Т до 0,32-0,42 прочность снижается до 50%. При дисперсности, равной 350 м²/кг, прочность меньше, чем при дисперсности 150 м²/кг; следовательно, чрезмерная дисперсность песка снижает прочность бетона даже при большом расходе цемента.

А.П. Меркин [4] установил, что снижение прочности ячеистого бетона начинается при дисперсности песка 3500-4000 см²/г, так как при указанной дисперсности преобладающее влияние на прочность оказывает плотность и толщина межпоровых перегородок.

В.П. Варламов и И.К. Судина [9] считают, что повышение дисперсности песка сверх оптимальной приводит к образованию низкоосновного гидросиликата кальция (гидрата с С/С менее 0,7), имеющего меньшую прочность по сравнению с С-S-H (I) и тоберморитом 1,13 нм.

При низкой активности смеси (10%) увеличение содержания цемента приводит к некоторому повышению прочности; с увеличением активности смеси влияние расхода цемента не существенно. Следовательно, роль цемента в образовании прочностных свойств автоклавного ячеистого бетона незначительна.

Важным фактором, определяющим прочность бетона, являются качественные характеристики гидросиликатной связки, которые оценивались по методике ВНИИСтрома кристаллизационно-структурным коэффициентом (КСК), характеризующим отношение гидросиликатов кальция (ГСК) и простыми формами силикатных анионов к ГСК с высокой степенью конденсации силикатных анионов. Высокими техническими свойствами обладает гидросиликатная связка с КСК, приближающимся к единице [9].

Состав гидросиликатной связки, общее количество ГСК и КСК определяли на ячеистом бетоне с содержанием цемента 0-20% при постоянной активности смеси, равной 15% и $V/T=0,36$ (табл. 4). Гидросиликатная связка исследованного ячеистого бетона представлена смесью минералов тоберморитовой группы: 1,13 нм тоберморита, С-S-H (I) и С-S-H (II) с различной степенью конденсации силикатных анионов в их структуре.

Таблица 4 - Состав гидросиликатной связки и показатели бетона

Содержание цемента, %	КСК	Содержание ГСК, %	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент прочности, R/γ^2
0	1,4	29,0	670	4,3	98
5	1,76	32,2	530	3,5	126
10	2,27	34,5	480	3,4	148
15	3,08	40,8	495	3,6	146
20	3,96	42,3	520	3,1	114

Наиболее благоприятным составом характеризуется гидросиликатная связка, образующаяся в бетоне при относительно невысоком расходе цемента. С увеличением содержания цемента, несмотря на повышение объема ГСК, прочностные свойства ячеистого бетона практически не меняются, так как ухудшается качество гидросиликатной связки – увеличивается ГСК. Следовательно, для формирования гидросиликатной связки значительное присутствие цемента в составе автоклавного ячеистого бетона необязательно и не дает существенных преимуществ, что совпадает с данными других исследований. Например, Баженов П.И. отрицает необходимость присутствия цемента при изготовлении ячеистого бетона [10].

Однако, немаловажно в производстве продолжительность созревания сырца, лимитирующая производительность завода. Экспериментально установлено, для обеспечения пластической прочности сырца необходимой для транспортировки и разрезки массива, содержание цемента должно составлять около 10% массы сухих компонентов смеси.

Приведенные в качестве примера на рисунках 4 и 5 электронно-микроскопические снимки со скола образца плотностью 450 кг/м³ указывают область тоберморита с типичной структурой «карточного домика». В обоих случаях 40-50% скола занимают области хорошо закристаллизованной фазы, кристаллы которой представляются в виде копьевидных, ромбических или трапециевидных пластин. Судя по характерной морфологии, они, вероятно, принадлежат к тобермориту 1,13 нм ($11,3 \cdot 10^{-10}$). Толщина хорошо развитых кристаллов находится в границах $6 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ м, ширина доходит до $1 \cdot 10^{-6}$ м, а длина — до $2,5 \cdot 10^{-6}$ м. На отдельных участках кристаллики находятся еще на стадии выкристаллизовывания, представляясь в виде иголок толщиной около $1 \cdot 10^{-8}$ м и длиной $1 \cdot 10^{-7} \dots 6 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 4).

Одним из наиболее важных факторов является обеспечение морозостойкости и эксплуатационной долговечности ячеистого бетона. Считается, что для повышения морозостойкости необходимо увеличивать расход цемента, и для ячеистого бетона плотностью 500-600 кг/м³ он должен составлять не менее 20% массы сухих компонентов смеси.

Испытания морозостойкости проводили на ячеистом бетоне, изготовленном по ударной технологии при $V/T=0,32-0,4$ с содержанием цемента 5-20%. Все образцы с различным содержанием цемента выдержали испытания при 75 циклах Мрз. Следственно, при использовании ударной технологии роль цемента в обеспечении необходимой морозостойкости ячеистого бетона несущественна.



Рисунок 4 - Электронно-микроскопический снимок, выполненный методом реплик, со скола образцов бетона с $\gamma = 450 \text{ кг/м}^3$, изготовленного по ударной технологии

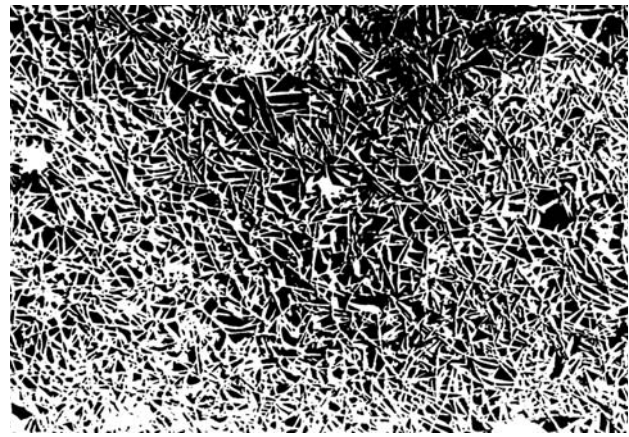


Рисунок 5 - Электронно-микроскопический снимок, выполненный методом реплик, со скола образцов бетона с $\gamma = 450 \text{ кг/м}^3$, изготовленного по ударной технологии

В работе [11] указано, что морозостойкость ячеистого бетона тем выше, чем меньше В/Ц. Наиболее эффективным способом снижения водосодержания смеси при формировании является использование динамических (ударных) воздействий. При литевой технологии для обеспечения морозостойкости ячеистого бетона необходимо прибегать к такому неэффективному и неэкономичному способу снижения В/Ц, как увеличение расхода цемента.

На основании разработанных оптимальных технологических параметров смеси и режимов ударного формирования на целом ряде заводов ячеистого бетона был проведен обширный комплект работ по внедрению и освоению производства, в т.ч. и сравнению с вибрационной и литевой технологиями.

Результаты сравнительных испытаний различных способов формирования (ударной, вибрационной и литевой) массивов $6,0 \times 1,2 \times 0,6 \text{ м}$ (табл. 5) показали, что при уменьшении расхода цемента на 25% по вибрационной и ударной технологиям по сравнению с литевой обеспечивается высокое качество ячеистого бетона, при этом пластическая прочность сырца примерно в два раза выше по сравнению с сырцом, полученным литевым способом формирования.

Технологические параметры и физико-механические показатели ячеистого бетона, изготовленного в промышленных условиях, приведены в таблице 6.

Из таблицы 6 видно, что при оптимальных параметрах смеси и режимах формирования обеспечиваются высокие физико-механические показатели ячеистого бетона при формировании массивов высотой 60-90 см. При этом, время от начала затворения смеси, до разрезки на изделия заданных размеров составляет 1,5-2,0 часа (высота массива 60 см) – в случае переноса массива захватом на стол резательной машины и 0,5-0,7 часа, при разрезке массива на поддоне формы (высота массива 90 см).

Наряду с физико-механическими показателями ячеистого бетона, рассмотренными выше, важнейшими показателями являются его эксплуатационная стойкость и долговечность. Поэтому был проведен обширный комплекс исследований с целью проверки эксплуатационной надежности изготавливаемого материала и изделий [12].

Известно, что плотность бетона по высоте массива изменяется, а, следовательно, и прочность тоже изменяется. Кроме того, прочность бетонная перпендикулярно и параллельно направлению вспучивания ячеистобетонной смеси различна.

В таблице 7 в качестве примера приведены результаты исследований ячеистого бетона (массив $6,2 \times 1,2 \times 0,6 \text{ м}$), полученного в ходе совместной работы со специалистами фирмы «Хебель» в условиях Гродненского КСМ.

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ВИРОБИ ТА САНІТАРНА ТЕХНІКА

Таблиця 5 - Результаты сравнительных испытаний вибрационной, ударной и литевой технологии формирования ячеистобетонных массивов 6,0×1,2×0,6 м

Способ формования	Состав смеси, % от веса сухих компонентов			Водотвердое отношение (В/Т)	Начальная подвижность смеси по прибору Суттарда, см	Пластическая прочность ячеистобетонного сырца через 1 ч от начала затворения смеси, кПа	Физико-механические показатели бетона		
	известково-песчаная смесь	цемент М 400	газообразователь, алюминий-евая пудра ПАП-1				плотность бетона (γ), кг/м ³	прочность при сжатии (R), МПа	коэф. конструктивного качества,
Вибрационный	84,0	16	0,085	0,39	13,0	33,9	633	5,1	127
Ударный	85,0	15	0,085	0,39	13,0	34,3	555	4,4	143
Литевой	80,0	20	0,080	0,46	24,0	17,5	626	4,6	117

Примечание:

- активность известково-песчаной смеси 14-15%;
- удельная поверхность смеси равна 3700-3800 см²/г, в том числе песка в ней 2300-2400 см²;
- автоклавный режим 3+8+3 ч при 1,0 МПа.

Таблиця 6 - Технологические параметры смеси и показатели ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии

Высота массива	Состав ячеистобетонной смеси, кг/м ³				Время до разрезки сырца, ч	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
	Цемент	Известь (СаО) (100%)	Песок	Алюминиевая пудра			
Высота массива 60 см	70	58	320	0,57	1,5—2	489	4,04
	60	69	319	0,60	1,5—2	483	3,69
Высота массива 90 см	60	70	320	0,58	0,5—0,7	491	3,45
	70	60	320	0,58	0,5—0,7	505	4,10

При оптимальных параметрах смеси и регулируемых режимах формование массивов 6,2×1,2×0,6 м обеспечивается высокая однородность ячеистого бетона. Коэффициент анизотропии бетона [5] (отношение прочности на сжатие параллельно вспучиванию к прочности перпендикулярно вспучиванию) составляет 0,9.

Карбонизационную усадку исследовали по методике УралпромстройНИИпроекта в среде 100% CO₂ в течение 400 ч, стойкость при переменном увлажнении – высушивании (K_ц) определяли по режиму 7 ч – увлажнение и 15 ч – высушивание при 105°С в течение 75 циклов. Атмосферостойкость ячеистобетонных панелей плотностью 500 кг/м³, изготовленных при содержании цемента 70 кг/м³, определяли по методике НИИстройфизики и НИПИ силикатобетона на установке УМТ при одностороннем воздействии климатических факторов на водонасыщенный материал. Никаких признаков разрушения ячеистого бетона после 75 циклов дождевания, замораживания – оттаивания и ультрафиолетового облучения не обнаружено.

Таблица 7 - Физико-механические показатели ячеистого бетона

Место отбора образцов из массива	Вертикально к направлению вспучивания		Параллельно к направлению вспучивания	
	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа ($R_{сж}^{\perp}$)	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа ($R_{сж}^{\parallel}$)
Верх	477	3,21	475	3,46
Середина	477	3,92	475	3,36
	485	—	480	3,36
Низ	488	4,22	479	3,73
	485	4,36	484	3,92
Среднее значение	482	3,93	479	3,57

Таблица 8 - Состав смеси и физико-механические показатели ячеистого бетона

Состав, %, массы сухих			Плотность, кг/м ³	Предельная растяжимость, мм/м	$R_{сж}$, МПа	Карбонизационная усадка, мм/м	$K_{ц}$	$K_{Мрз}$
Цемент	известки	песка						
5	15	80	530	0,80	3,5	0,62	0,93	0,89
10	15	75	480	0,88	3,4	0,77	0,96	0,88
15	15	70	495	0,70	3,6	0,90	0,92	0,70
20	15	65	520	0,66	3,1	1,16	0,88	0,66

Высокие показатели эксплуатационной стойкости объясняются тем, что снижение В/Т приводит к рациональному изменению пористой структуры (уменьшению общей капиллярной пористости и снижению количества опасных капиллярных пор размерами 0,1-0,01 мкм), способствующему повышению его долговечности и эксплуатационной стойкости.

Армированные стеновые панели (расход арматурной стали 25 кг/м³) плотностью 500 кг/м³ были испытаны на прочность и жесткость в соответствии с ГОСТ 8829-77, а так же были определены прочностные, деформационные и другие физико-механические показатели бетона [13].

Высокие показатели прочности и жесткости армированных панелей, при прочих равных условиях, обусловлены повышенным сцеплением арматуры с бетоном. Сцепление арматуры с бетоном составляет 35-40% от прочности бетона при сжатии. При традиционной литевой технологии, как правило, наблюдается неполное обволакивание смесью арматурных стержней, особенно в верхней зоне формируемого массива, обусловленное недостаточным гидростатическим давлением смеси. В конечном итоге вокруг арматуры, расположенной перпендикулярно направлению вспучивания смеси, образуются пустоты и так называемые «тени», которые и приводят к снижению сцепления арматуры с бетоном и уменьшению прочности и жесткости армированных изделий.

Исследования закономерностей колебаний системы «форма, кондуктор – арматурный

каркас» показали, что при ударном формовании значения ускорения колебаний смеси находятся в пределах от 10 до 30 м/сек² и перегрузки, складываясь с гидростатическим давлением, ликвидируют пустоты или «тени» вокруг арматурных стержней [13]. На образование структуры бетона в околоарматурном пространстве оказывают влияние колебания системы (смесь, арматурные стержни и форма). Эти колебания имеют различную частоту, интенсивность и, главное, различную продолжительность. Из-за различных параметров колебаний элементов системы во время ударного формования ячеистобетонной смеси в околоарматурном пространстве образуется зона, в которой смесь находится постоянно в предельно разрушенном (разжиженном) состоянии. За счет этого обеспечивается плавный переход от практически плотного бетона у арматуры до ячеистой структуры основного бетона, причем толщина переходного слоя составляет 5-7 мм.

Кроме того, при формовании ячеистобетонных армированных массивов по литевой технологии, особенно при повышенных значениях вязкости смеси, наблюдается так называемое «всплытие» (смещение арматурных стержней в направлении вспучивания смеси) арматуры, несмотря на ее относительно жесткое фиксирование в форме специальными устройствами. Арматурный каркас смещается от требуемого положения в массиве, что вызывает дополнительное напряжение от упругих сил арматуры и отрицательно сказывается на прочности и жесткости армированных изделий. При ударном формовании всплытия арматурных каркасов не происходит.

Высокие показатели имеет газобетон и на базе золы-уноса ТЭЦ Среднего Урала [14, 15]. По литевой технологии плотность бетона составляет 541-578 кг/м³, прочность при сжатии — 3,5-4,4 МПа, коэффициент конструктивного качества — 119-130, морозостойкость — 25 циклов; по ударной технологии плотность — 490-525 кг/м³, прочность при сжатии — 4,2-5,4 МПа, коэффициент конструктивного качества — 174-195, морозостойкость — более 35 циклов.

Для проектирования новых заводов ячеистого бетона в различных регионах СССР в ГАО «Силбет» и НИПИ силикатобетон испытывали сырьевые материалы по двум известным технологиям: литевой и ударной. По результатам испытаний были разработаны технологические регламенты на проектирование заводов различной производительности — от 20 до 200 тыс. м³ ячеистобетонных изделий в год, в т.ч. и типовой проект завода ячеистого бетона 409-021-4887. Испытано около 130 видов сырьевых материалов по составу и свойствам из разных регионов. В качестве вяжущих использовали известь, цемент, высокоосновную сланцевую золу, доменный шлак, а качестве кремнеземистых компонентов — кварцевый песок или кислую золу [5, 16].

Свойства извести и цементов колебались в широких пределах и часто не отвечали требованиям для производства ячеистых бетонов.

В результате испытаний ячеистого бетона было установлено, что по данным лабораторных и промышленных исследований физико-механические показатели бетона, изготовленного по ударной технологии, значительно, превышают аналогичные показатели бетона, полученного по литевой технологии.

В таблицах 9 и 10 в качестве примера приведены результаты экспериментов. Анализ данных свидетельствует о влиянии свойств сырьевых материалов и способа изготовления на прочностные показатели ячеистого бетона.

Плотность ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии, в среднем на 10 % ниже, чем бетона аналогичного состава, полученного литевым способом. Это создает предпосылки к снижению расхода алюминиевой пудры при изготовлении ячеистого бетона одинаковой плотности, если применять ударную технологию формования вместо литевой.

Полученные данные свидетельствуют о преимуществе ударной технологии. Снижение на 10—25 % водосодержания смеси приводит к увеличению прочностных показателей ячеистого бетона на 25—50 % при оптимальных составах смеси. При этом для оптимальных составов по прочности ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии, характерно снижение активности смеси по содержанию извести.

Таблица 9 - Характеристик сырьевых материалов для ячеистобетонных смесей

№ серии опытов	Известь		Цемент		Кварцевый песок SiO ₂ , %	Отходы промышленности		
	Активность, %	Время гашения, мин	Марка	Начало схватыва- ния, ч-мин		Доменный шлак Косн.	Зола	
							Кислая	Основная
							Содержание	
SiO ₂ , %	CaO _{св.} , %							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	39	4	ШПЦ-400	1-50	82	-	-	-
	Жигулевский завод							
2	60	7	ШПЦ-400	3-00	92	-	-	-
	Кушумгинский завод		Амвросиевский завод					
3	77	14	Алитиновый	0-40	80	-	-	-
4	73	7	ПЦ-400	2-55	-	-	Из отвалов ТЭЦ ПО «Кондопогабумпром»	-
5	62	13	ПЦ-400	0-45	-	-	Из отвалов Добротворской ГРЭС	
			Николаевский завод					
6	62	13	ПЦ-400	2-30	-	-	Зола унос Красногорской ТЭЦ, 60	-
	Каменск-Уральский завод		Сухоложский завод					
7	77	6	ПЦ-400	2-30	-	-	Зола-унос Рефтинской ГРЭС, 60	
	Богдановичский завод		Сухоложский завод					
8	60	7	-	-	92	1,13	-	-
	Кушумгинский завод					Запорожский завод		
9	72	8	ПЦ-400	2-30	85	1,3	-	-
	ПО «Луганскжелезобетон»		Старооскольский завод			Коммунарский завод		
10	57,5	4	ПЦ-400	2-30	63	1,09	-	-
	Челябинский завод					Челябинский завод		
11	-	-	-	-	78	-	-	Сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС, 18

Так же установлено, что для получения бетона одинаковых прочностных показателей при применении ударной технологии возможно уменьшение до 30 % расхода цемента.

Известно, что существенным показателем при производстве ячеистого бетона является сокращение продолжительности выдержки массива-сырца до распалубки форм и разрезки его на изделия заданных размеров. При ударной технологии время «созревания» массива сокращается в 1,5—2 раза по сравнению с таковым показателем при литевой технологии.

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ВИРОБИ ТА САНІТАРНА ТЕХНІКА

Таблиця 10 - Состав смеси и физико-механические показатели ячеистого бетона

№ серии опытов	Способ формирования	Содержание, %		Характеристики ячеисто-бетонной смеси		Свойства ячеистого бетона				
		СаО акт.	Цемент	В/Т	Начальная подвижность по Суттарду, см	Время достижения сырьем пластической прочности – 30 кПа, ч	Плотность, кг/м ³	Прочности при сжатии, МПа		Коэффициент качества $R_{сжк}/\gamma^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Известково-цементное вяжущее, кварцевый песок										
1	Ударный	20	15	0,43	13,5	2	601	4,1	4,1	114
		18	15	0,43	14	2	524	3,4	4,5	124
		15	15	0,42	12,5	2,5	552	4,6	5,5	151
		13	15	0,41	12,5	2,5	556	3,4	3,8	110
	Литьевой	20	15	0,49	22	2,5	618	4,1	3,8	108
		18	15	0,49	23	2,5	598	3,9	3,9	109
		15	15	0,53	26	3	568	3,2	3,6	100
		13	15	0,50	27	3	596	3,3	3,4	93
2	Ударный	18	15	0,41	13	1,5	581	4,4	4,6	130
	Литьевой	18	15	0,48	21	3,5	618	4,0	3,8	105
3	Ударный	14	15	0,35	12	1	597	4,4	4,4	124
		12	15	0,35	15	1,5	633	4,9	4,4	122
		14	10	0,37	12,5	2	566	3,9	4,4	122
	Литьевой	14	15	0,45	20	2,5	600	3,6	3,6	100
		14	10	0,43	20	3	603	3,4	3,4	94
Известково-цементное вяжущее, зола ТЭС										
4	Ударный	18	15	0,43	13,5	0,5	561	3,2	3,7	102
		18	15	0,47	15,5	1	503	2,9	4,1	115
	Литьевой	18	15	0,51	25	1	618	2,9	2,8	76
		18	15	0,52	23,5	1	571	2,9	3,2	89
5	Ударный	18	10	0,43	11	1,5	614	4,2	4	111
	Литьевой	18	15	0,43	24	1,5	617	2,2	2,1	58
6	Ударный	13	15	0,58	13	1,5	525	5,3	6,9	192
	Литьевой	14	20	0,7	21	3	578	4,4	4,7	132
7	Ударный	14	15	0,50	16	1,5	527	5,1	6,6	184
	Литьевой	14	15	0,58	20	2,5	552	4,2	4,9	138
Известково-шлаковое вяжущее, кварцевый песок										
8	Ударный	16	14*	0,40	13	2	582	3,8	4,0	112
	Литьевой	18	10*	0,48	21	2,5	658	4,6	3,8	106
9	Ударный	14	15*	0,39	15	1	600	4,7	4,7	131
	Литьевой	15	16*	0,47	24	2,5	620	3,8	3,5	99
10	Ударный	13	10**	0,36	11	2	617	4,6	4,4	121
	Литьевой	15	15*	0,42	22	3	609	3,7	3,6	100
Сланцезольное вяжущее, кварцевый песок										
11	Ударный	60 : 40**		0,43	13	2,5	551	4,6	5,5	152
	Литьевой	60 : 40**		0,46	24	3,5	573	3,8	4,2	116

Примечание: * Содержание шлака, % ** Соотношение зола : песок
Номера серий опытов соответствуют номерам серий опытов табл. 9.

Ударная технология эффективна так же и при использовании некондиционных сырьевых материалов и вторичных продуктов. Благодаря возможности управлять процессом вспучивания ячеистобетонной смеси путем регулирования частоты и энергии, на базе отходов промышленности получен ячеистый бетон, отвечающий современным требованиям. Использование зол ТЭС для производства ячеистого бетона по ударной технологии проверено в условиях промышленного производства.

Так, например, с применением сланцевой зовы Прибалтийской ГРЭС в качестве вяжущего при изготовлении армированных панелей из сланце-зольного газобетона по ударной технологии на Нарвском КСМ достигнуты сокращение доавтоклавной выдержки на 1 ч. и увеличение прочности на 20 %.

В заключение следует отметить, что на основании результатов обширных экспериментальных исследований, а также 30-ти летнего опыта промышленного производства, в первую очередь в Республике Беларусь, установлено, что ударная технология по сравнению с литьевой позволяет:

уменьшить расход сырьевых материалов: цемента на 20-30 %, извести на 10-15%, газообразователя на 5-10 %;

- уменьшить более чем в два раза количество литьевых форм;
- уменьшить более чем в два раза количество постов созревания, а следовательно размеров камер созревания и габаритов капитального сооружения цеха;
- уменьшить энергозатраты на 10-20% при помолу кремнеземистого компонента и автоклавной обработки благодаря применению материалов с более низкой тонкостью помола и смеси с пониженным содержанием воды;
- повысить на 25-40% прочностные показатели, при аналогичных сырьевых материалах;
- исключить необходимость применения гипса;
- использовать исходные сырьевые материалы с более низкими качественными показателями;
- снизить отпускную влажность бетона до 25 %;
- при изготовлении армированных изделий исключить «всплывание» арматурных каркасов, обеспечивая гарантию их проектного положения в изделиях;
- увеличить сцепление бетона с арматурой за счет более плотного обволакивания стержней бетонной массой.

В настоящее время в Республике Беларусь из общего объема производства 3,0 млн. м³ в год по ударной технологии производится 85%. Предприятия выпускают серийно ячеистобетонные блоки первой категории плотностью 400-700 кг/м³ В 1,5-3,5. ОАО «Сморгоньсиликатобетон» освоило производство армированных изделий по ударной технологии на линии «Маза-Хенке» «Варио-Блок», а СЗАО «КварцМелПром» приступает к производству ячеистобетонных армированных изделий так же на линии «Маза-Хенке».

В Российской Федерации работает целый ряд современных заводов ячеистого бетона с применением ударной технологии поставленных фирмами «Маза-Хенке» и «Верхан».

Авторы статьи надеются, что обобщение некоторых вопросов теории и практики ударной технологии послужит дальнейшему совершенствованию производств, работающих по энергосберегающей ударной технологии, а при планировании строительства новых заводов ячеистого бетона позволит сделать объективную технико-экономическую оценку выбираемой технологии и адаптировать её применительно к существующей местной сырьевой базе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров Г.П. «Физико-химические и технические основы повышения надежности изделий из ячеистого бетона». Автореферат диссертации на соискание ученой степени док. техн. наук, М, - 1988, с. 17.

2. Меркин А.П., Мейкерт Г.О., Сажнев Н.П. и др. «Энергосберегающая технология ячеистобетонных изделий», // «Бетон и железобетон», № 12, 1986, с. 16-18.
3. Рейман В.А. «Прогнозирование качества гидросиликатов кальция и прочности автоклавных известково-песчаных (кварцевых) бетонов». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. - Ленинград, 1977, 39 с.
4. Меркин А.П. «Научные и практические основы улучшения структуры и свойств поризованных бетонов». Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М, 1972. – с.
5. Сажнев Н.П., Сажнев Н.Н., Сажнева Н.Н., Голубев Н.М. «Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика». Стринко, Минск, 2010 – с. 124-170.
6. Домбровский А.В. «Исследование ударной технологии формования ячеистобетонных изделий». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М, 1980 – 138 с.
7. Куннос Г.Я., Терентьев А.Е., Сажнев Н.П. и др. «Теория и практика ударного формования газобетонных массивов// Бетон и железобетон, - 1986. - № 8 – с. 14-15.
8. Пауэрс Т.К. «Физическая структура поргидроцементного теста. Химия цемента» – М.: Стройиздат, 1969. с. 300-320.
9. Варламов В.П., Судина Н.К., Кузнецова Л.А. и др. «Оценка качество гидросиликатной связки силикатных бетонов» // Строительные материалы. – 1979, - №10. – с. 26-27.
10. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1978. – 367 с.
11. Шейкий А.Е., Добщик Л.М., Баранов А.Т. Критерии морозостойкости ячеистых бетонов автоклавного твердения // Бетон и железобетон. – 1986. - № 5. – с. 31-32.
12. Меркин А.П., Мейнерт Г.О., Сажнев Н.П. и др. « О возможности снижения расхода цемента в ячеистом бетоне» // «Бетон и железобетон». 1988. - № 7 (400). – с. 7-9.
13. Сажнев Н.П., Сажнев Н.Н. «Производство армированных ячеистобетонных изделий по ударной технологии». Сборник трудов 3-го международного научно-практического семинара «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве». Севастополь, 2007. с. 138-143.
14. Горяйнов К.Э., Повель Э.В., Сажнев Н.П. и др. «Исследования по выбору технологических параметров и режимов изготовления ячеистого бетона на основе золы-уноса электростанций Среднего Урала». Сб. трудов «НИПИ силикатобетон. «Технология и оборудование для производства автоклавных стеновых материалов». Таллинн, 1987, с. 57-69.
15. Вишневский А.А., Левченко В.И. «Производство изделий из автоклавного газобетона на основе золы-уноса в условиях ООО «Рефтинское объединение». Таллинн. // «Белорусский строительный рынок» № 9-10, 2006.
16. Сажнев Н.П., Домбровский А.В., Новаков Ю.Я. и др. «Некоторые технико-экономические показатели ячеистого бетона, изготовленного по литевой и ударной технологиям» // «Строительные материалы». № 9 (453), 1992, с. 11-13.