

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.973.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ МАССИВА ПО ТЕХНОЛОГИИ ВСТРЯХИВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗОСИЛИКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

канд. техн. наук, доц. **В.В. БОЗЫЛЕВ, Е.В. РЯДЧИКОВ**
(Полоцкий государственный университет)

Представлен обзор современного состояния производства ячеистобетонных изделий в Республике Беларусь. Приводятся данные по разработанной технологии встряхивания при формировании массива в производстве газосиликатных изделий. Показана лабораторная установка для определения режимов ведения процесса по технологии встряхивания. Представлены результаты определения параметров режима формирования, найденные с использованием метода планирования эксперимента. Выполнена статистическая обработка результатов эксперимента и получены адекватные математические модели плотности и прочности ячеистого бетона. Предложена методика, которая позволяет в зависимости от заданной плотности установить основные параметры этапа формирования ячеистых бетонов по технологии встряхивания: показатель водотвердого отношения, амплитуду и частоту ударов, а также найти прогнозируемый показатель прочности изготавливаемых изделий.

Введение. В настоящее время производство ячеистого бетона автоклавного твердения занимает лидирующую позицию в промышленности строительных материалов Республики Беларусь. Об этом свидетельствует 6-я международная научно-практическая конференция «Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения», прошедшая 26 – 28 мая 2010 года в г. Минске. Как следует из материалов конференции, высокими темпами происходит модернизация предприятий, выпускающих ячеистобетонные изделия автоклавного твердения, сочетая отечественную ударную технологию и импортное резательное оборудование [1].

К примеру, в 2004 году на Могилевском комбинате силикатных изделий после реконструкции одной из действующих технологических линий введена в промышленную эксплуатацию новая линия по производству ячеистобетонных изделий. В технологической линии объединена отечественная ударная технология и резательная технология фирмы «Маза-Хенке». По ударной технологии формируют массивы размером $6 \times 1,5 \times 0,6$ м, которые после выдержки на постах созревания кантуются на 90° на свой продольный борт и транспортируются на комплекс резательных машин. После разрезки массивов на изделия заданных размеров они запариваются в автоклавах диаметром 3,6 м. Запаренный массив разбирается и далее упаковывается. Годовая производительность линии 120 тыс. м^3 (в цеху установлено три автоклава). В помольном, смесеприготовительном, формовочном, автоклавном отделениях была проведена модернизация отечественного оборудования и систем автоматического управления технологическими процессами. В 2010 году на Могилевском комбинате силикатных изделий введена в промышленную эксплуатацию вторая новая технологическая линия по производству ячеистобетонных блоков. Годовая производительность линии 300 тыс. м^3 . Основное технологическое оборудование (формовочное, резательное и упаковочное) поставлено фирмой «Маза-Хенке». На обеих новых линиях производятся блоки I и II категории (геометрическая точность $+1,0 - 1,5$ мм). Кроме того, на линии типа «Силбетблок» предприятие производит ячеистобетонные блоки III категории (кладка на раствор).

В 2005 году в ОАО «Сморгоньсиликатобетон» проведена реконструкция всего производства ячеистого бетона. В ходе реконструкции были объединены две технологии – отечественная ударная и немецкая резательная фирмы «Маза-Хенке». Производительность линии 1000 м^3 изделий в сутки. Из отечественного технологического оборудования было оставлено только помольное оборудование (мельницы мокрого помола песчаного шлама и сухого помола известково-песчаного вяжущего), а также восемь автоклавов диаметром 3,6 м. На шаровых мельницах была проведена модернизация, обеспечивающая точную дозировку компонентов в мельницу и необходимую тонкость помола песка в шламе и известково-песчаного вяжущего. Удельная поверхность песка в шламе 2700 $\text{см}^2/\text{г}$, известково-песчаного вяжущего 4850 – 5500 $\text{см}^2/\text{г}$ и песка в нем 1700 – 1900 $\text{см}^2/\text{г}$. На автоклавах установлена современная отечественная автоматизированная система управления гидротермальной обработки ячеистобетонных изделий.

Специалистами ОАО «Забудова», ОАО «Сморгоньсиликатобетон» совместно с представителями фирмы «Маза-Хенке» была разработана конструкция современной ударной площадки грузоподъемностью 15 т. Немецкая фирма изготовила и поставила две ударные площадки. Оптимальное соотношение массы формы со смесью и верхней рамы ударной площадки к массе нижней рамы ударной площадки и

массе фундамента, а также специальный профиль эксцентрика кулачкового механизма обеспечили при минимальной высоте максимальную энергию удара. Уровень шума при одновременной работе двух ударных площадок значительно ниже требований санитарных норм.

При пониженном количестве воды затворения и расходе вяжущих материалов (цемента и извести активностью 70 %) без применения гипса устойчиво обеспечиваются высокие физико-механические показатели бетона, кроме того интенсифицируются производственные процессы.

Для сравнения, в ОАО «Забудова» при изготовлении ячеистого бетона по литьевой технологии фирмы «Кселла» («Хебель») при аналогичной суточной производительности 1000 м³ используется 50 форм, а в ОАО «Сморгоньсиликатобетон» при ударной технологии – 18 форм. Время выдержки массива до разрезки на изделия заданных размеров, например, при плотности бетона 400 кг/м³ составляет в ОАО «Забудова» 5 – 5,5 часа в камерах с теплоносителем, а в ОАО «Сморгонь-силикатобетон» – 1,5 – 2,0 часа в камерах без теплоносителя. При плотности ячеистого бетона 400 кг/м³ класс по прочности составляет В1,5 – 2,0, морозостойкость F > 25. Геометрическая точность изделий составляет +1,0 – 1,5 мм по высоте, длине и ширине.

В настоящее время после относительно небольшой модернизации существующей технологической линии ОАО «Сморгоньсиликатобетон» приступило к освоению производства армированных изделий (плиты покрытия, перекрытия и стеновые панели) по ударной технологии. Продукция будет использоваться при строительстве энергоэффективных жилых домов по проектам института Гродногражданпроект.

В 2005 году в ОАО «Любанский завод стеновых блоков» была проведена модернизация одной из технологических линий по производству ячеистобетонных блоков типа «Бобруйск-1,2». На линии установлен комплект резательных машин Воронежского ЗАО «Тяжмехпресс». Аналогом является резательная технология, освоенная немецкими фирмами «Итонг», т.е. массив кантуется на 90° на подставной борт-поддон, разрезается на изделия заданных размеров струнами диаметром 0,8 мм и после автоклавной обработки производится разделение блоков по горизонтальным резам. Используются существующие помольное, дозировочное, смесеприготовительное и автоклавное (автоклавы проходные диаметром 2,0 м) отделения. Завод выпускает ячеистобетонные блоки плотностью 400 – 500 кг/м³, прочность на сжатие 2,0 – 2,5 МПа. Геометрическая точность блоков ±1,5 мм (II категория). Кроме того, предприятие на линии типа «Бобруйск-1,2» производит ячеистобетонные блоки III категории. Обе линии работают по литьевой технологии.

В 2006 году на Гродненском комбинате строительных материалов введена в эксплуатацию новая линия по производству ячеистобетонных блоков типа «WEHRHAIN SMART». Фирмой «Верхан» был поставлен комплект резательных машин, формы, смесеприготовительное, дозировочное и транспортное оборудование применительно к тупиковым автоклавам диаметром 3,6 м. Помольное и автоклавное отделения (три автоклава), а также ударные площадки (две) используются существующие.

В отличие от линий «Маза-Хенке» типа «Варио-Блок», установленных на Могилевском КСИ и ОАО «Сморгоньсиликатобетон», на линии WEHRHAIN SMART за счет повторного обратного кантования массива на запарочную решетку исключается (удаляется) нижний подрезной слой массива, который в виде обратного шлама возвращается в технологию. После автоклавной обработки отсутствует разделительная машина для готовой продукции. На новой линии предприятие выпускает ячеистобетонные блоки плотностью 400 – 500 кг/м³, В1,5 – 2,0. Геометрическая точность блоков ±1,0 – 1,5 мм. Кроме того, предприятия на линиях типа «Универсал-60» и «Силбетблок» производят ячеистобетонные блоки III категории. Все линии работают по ударной технологии.

В 2009 году в Беларуси был введен в эксплуатацию ряд новых заводов (цехов) по производству ячеистобетонной продукции. На Березовском комбинате силикатных изделий пущен завод по изготовлению ячеистобетонных изделий с суточной производительностью 1200 м³. Все технологическое оборудование поставлено фирмой «Маза-Хенке». Завод работает по ударной технологии и выпускает блоки плотностью 400 – 500 кг/м³, В1,5 – 2,0. Геометрическая точность блоков +1,0 – 1,5 мм. Ранее действующее производство ячеистого бетона с использованием резательного комплекса типа «Универсал-60» ликвидировано. В ОАО «Красносельскстройматериалы» введен цех по выпуску ячеистобетонных изделий с суточной производительностью 650 м³. Основное технологическое оборудование поставлено фирмой «Маза-Хенке», автоклавы – российской фирмой «Уралхиммаш». Завод работает по ударной технологии и выпускает блоки плотностью 400 – 500 кг/м³, В1,5 – 2,0. Геометрическая точность блоков +1,0 – 1,5 мм. На Минском КСИ выходит на проектную мощность цех по изготовлению ячеистобетонных блоков суточной производительностью 1000 м³. Основное технологическое оборудование поставлено фирмой «Маза-Хенке», автоклавы – российской фирмой «Уралхиммаш». Завод работает по ударной технологии и выпускает блоки плотностью 400 – 500 кг/м³, В1,5 – 2,0. Геометрическая точность блоков +1,0 – 1,5 мм. Кроме того, на линии типа «Силбетблок» предприятие производит ячеистобетонные блоки III категории. В ОАО «Оршастройматериалы» была произведена модернизация производства, установлен комплект резательного оборудования Воронежского ЗАО «Тяжмехпресс». Геометрическая точность ячеистобетонных блоков составляет +1,5 мм. Предприятие производит ячеистый бетон по литьевой технологии. В ООО «Газосиликат» (г. Могилев) работает завод по изготовлению ячеистобетонных блоков суточной производительностью 1000 м³. Основное технологическое оборудование выпущено китайской фирмой SHANJZHOU TEEYER

ENGINEERING MACHINERY CO. LTD. Завод работает по литьевой технологии и выпускает блоки плотностью $400 - 500 \text{ кг/м}^3$, прочность на сжатие $1,5 - 2,0 \text{ МПа}$. Геометрическая точность блоков $+1,5 \text{ мм}$.

В настоящее время в СЗАО «КварцМел-Пром» (п. Хотиславль, Брестская обл.) ведется строительство нового завода по изготовлению ячеистого бетона суточной производительностью 1450 м^3 . Все технологическое оборудование поставлено фирмой «Маза-Хенке». Начаты работы по строительству завода ячеистобетонных изделий в ООО «Евросиликат» (г. Иваново, Брестская обл.) с использованием технологического оборудования китайских фирм. В ОАО «Гомельстройматериалы» выпуск ячеистобетонных изделий (блоки III категории) осуществляется с использованием резательного комплекса типа «Универсал-60». Реконструкцию производства планируется провести в 2012 году.

Планируется расширение производства ячеистобетонных изделий в ОАО «Забудова», а также строительство новых заводов в ООО «Лотос» (г. Мозырь, Гомельская обл.) и ООО «Славушка» (г. Климовичи, Могилевская обл.) [1].

Основная часть. Вопросы выбора режимов формования по ударной технологии, т.е. назначения частоты и амплитуды ударов, обеспечивающих наибольшую эффективность вспучивания ячеистобетонной смеси и оптимальные физико-механические свойства выпускаемых изделий, остаются неразрешенными. Сложность состоит в некотором разбросе параметров заливаемой смеси, таких как начальная температура, количество алюминиевой суспензии, качество исходных материалов. Данная проблема может быть решена за счет применения новой установки для вспучивания ячеистобетонной смеси, разработанной в Полоцком государственном университете, и на которую получен патент [2].

Для оценки эффективности новой технологии и определения оптимальных параметров режима формования выполнены сопоставительные исследования процесса вспучивания сырьевой смеси по литьевой технологии, ударной и технологии встряхивания. Исследования проводились в лабораторных условиях применительно к технологии газобетона. Технологический этап формования идентичен как для технологии получения газосиликата, так и для технологии газобетона.

В данной работе представлены результаты исследований, выполненных на лабораторной установке, конструктивное решение которой приведено в [2]. Опытная лабораторная установка представлена на рисунке 1. Создание необходимого динамического усилия для обеспечения технологии встряхивания производилось путем сжатия пружин (рис. 2). Встряхивание формы происходило за счет ударов площадки с формой об упоры ограничители (рис. 3).



Рис. 1. Опытная лабораторная установка

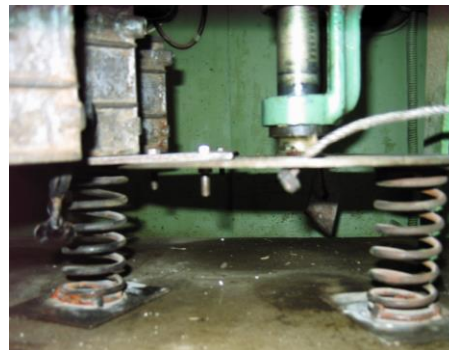


Рис. 2. Пружины для обеспечения динамического воздействия



а)



б)

Рис. 3. Упор-ограничитель при динамическом воздействии:
а – площадка в момент сжатия пружин; б – площадка в момент удара

Сжатие пружин и регулирование частоты ударов обеспечивалось вручную вращением маховика и кулачка. Регулирование амплитуды ударов выполнялось путем изменения высоты упора (рис. 4).

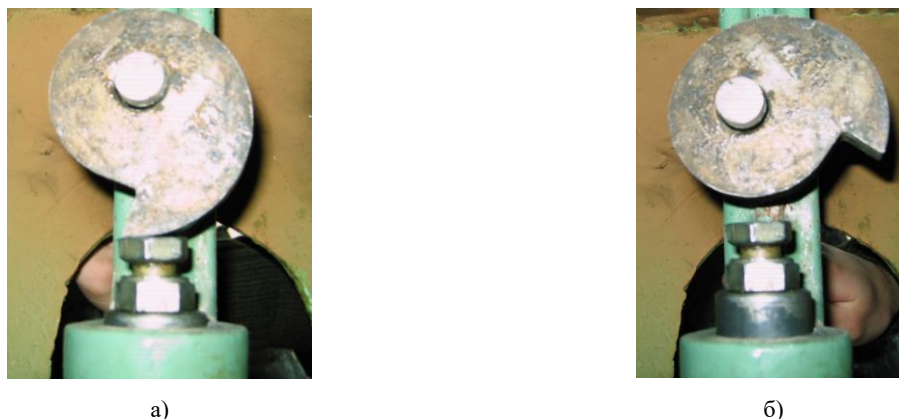


Рис. 4. Положение кулачка при динамическом воздействии:
а – в момент сжатия пружин; б – в момент удара

Сравнительные опыты по ударной технологии выполнялись на встряхивающем столике по ГОСТ 310.4-81 [3]. Исследование процесса вспучивания проводилось с использованием сырьевой смеси, содержащей 600 г цемента, 60 г извести, 290 мл воды, 1 г ПАВ, 1 г алюминиевой пудры. Эксперименты выполнялись в лабораторных условиях с подогревом форм при температуре воды затворения 70 °С. Высота заливки смеси 4,5 см. Результаты выполненных экспериментов представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Влияние частоты ударов на эффективность вспучивания при амплитуде ударов 0,7 см

№ п/п	Режим	Частота, уд/мин	Высота вспучивания, см
1	ударная вниз	6	9,5
2		8	9,5
3		10	10
4	ударная вверх	6	9,5
5		8	10,5
6		10	10,8

Таблица 2

Влияние частоты ударов на эффективность вспучивания при амплитуде ударов 1 см

№ п/п	Режим	Частота, уд/мин	Высота вспучивания, см
1	ударная вниз	6	9,5
2		8	10
3		10	9
4	ударная вверх	6	9
5		8	10,5
6		10	10,8

По данным таблиц построены графики влияния частоты ударов на эффективность вспучивания (рис. 5, 6).

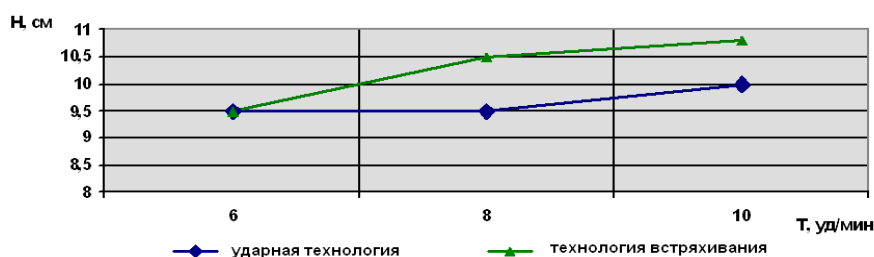


Рис. 5. Влияние частоты ударов на эффективность вспучивания при амплитуде ударов 0,7 см



Рис. 6. Влияние частоты ударов на эффективность вспучивания при амплитуде ударов 1 см

Полученные данные свидетельствуют о том, что при применении традиционной ударной технологии увеличение частоты ударов и уменьшение амплитуды воздействий снижает эффективность вспучивания смеси. По технологии встряхивания увеличение амплитуды и частоты ударов способствует процессу вспучивания.

Также выполнено теоретическое обоснование преимуществ и эффективности разработанной технологии встряхивания по сравнению с ударным способом формования – механическое воздействие по технологии встряхивания обеспечивает более эффективное вспучивание смеси [4]. Для перехода в производственных условиях на формование массива по технологии встряхивания важно выбирать оптимальные параметры процесса зависимости от заданной плотности и прочности изготавливаемых изделий. При этом основными факторами следует считать значение водотвердого отношения (В/Т), частоту и амплитуду ударных воздействий. Решение задачи определения режимов формования выполнялось с использованием метода планирования эксперимента. Был использован некомпозиционно-порционный план второго порядка при варьировании факторов на трех уровнях. Для статистического анализа и определения оптимальных параметров режима формования при технологии встряхивания выбраны следующие оптимальные факторы: частота ударов 10 уд/мин, амплитуда ударов 10 см.

Выбранные уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 3. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.

Таблица 3

Границы изменения факторов

Наименование фактора	Ед. изм.	Обозначение		Уровень варьирования		
		в кодированных переменных	в натуральных переменных	-1	0	+1
Водотвердое отношение		X ₁	В/Т	0,45	0,5	0,55
Амплитуда	мм	X ₂	A	5	10	15
Частота ударов	уд/мин	X ₃	v	5	10	15

Таблица 4

Матрица планирования и результаты экспериментов

№ опытов	План в кодированных переменных			Выходы		
	X ₁	X ₂	X ₃	прочность R, МПа	плотность сырца ρ, кг/м ³	плотность ρ, кг/м ³
1	1	1	1	0,84	725,36	580,29
2	-1	1	1	1,31	602,32	481,86
3	1	-1	1	1,06	680,00	544,00
4	-1	-1	1	1	764,16	611,33
5	1	1	-1	0,75	584,96	467,97
6	-1	1	-1	1,55	764,16	611,33
7	1	-1	-1	0,86	604,48	483,58
8	-1	-1	-1	1,22	853,36	682,69
9	1	0	0	1,01	812,00	649,60
10	-1	0	0	0,95	640,00	512,00
11	0	1	0	1,32	621,20	496,96
12	0	-1	0	0,8	660,00	528,00
13	0	0	1	1,42	853,36	682,69
14	0	0	-1	0,94	606,88	485,50
15	0	0	0	0,97	660,00	528,00
16	0	0	0	0,98	660,00	528,00
17	0	0	0	0,86	584,96	467,97

Выполнена статическая обработка результатов эксперимента с исключением в уравнениях регрессии слагаемых, имеющих коэффициенты, меньше значений доверительных интервалов, и с проверкой адекватности по критерию Фишера [5].

Полученные адекватные математические модели имеют вид:

1. Прочность ячеистого бетона, МПа

$$Y_1 = 0,998169 - 0,151 \cdot B/T + 0,083 \cdot A + 0,135704 \cdot v^2 - 0,12125 \cdot B/T \cdot A + 0,093 \cdot B/T \cdot v. \quad (1)$$

Проверка адекватности модели 3.1: $F_a = 13,025 < F_{табл.} = 19,3$.

2. Плотность сырца ячеистого бетона, кг/м³

$$Y_2 = 830,1831 + 49,9796 \cdot (B/T)^2 + 43,2625 \cdot B/T \cdot A + 72,9625 \cdot B/T \cdot v. \quad (2)$$

Проверка адекватности модели 3.2: $F_a = 6,07 < F_{табл.} = 19,3$.

3. Плотность ячеистого бетона, кг/м³

$$Y_3 = 608,3228 + 57,251 \cdot B/T \cdot v. \quad (3)$$

Проверка адекватности модели 3: $F_a = 3,536 < F_{табл.} = 19,3$.

Использование полученных моделей позволяет определить необходимые параметры формования в зависимости от заданной плотности и прочности получаемых газобетонных изделий.

Методика подбора режима формования в зависимости от заданных плотности и прочности ячеистого бетона включает следующие этапы:

1) определение оптимальной амплитуды ударов по технологии встряхивания. Для этого предлагается использовать номограммы в виде изолиний, построенных с использованием полученных адекватных математических моделей. По номограмме значение В/Т – амплитуда по значению плотности и рекомендуемому значению показателя В/Т находится соответствующее значение амплитуды (рис. 7);

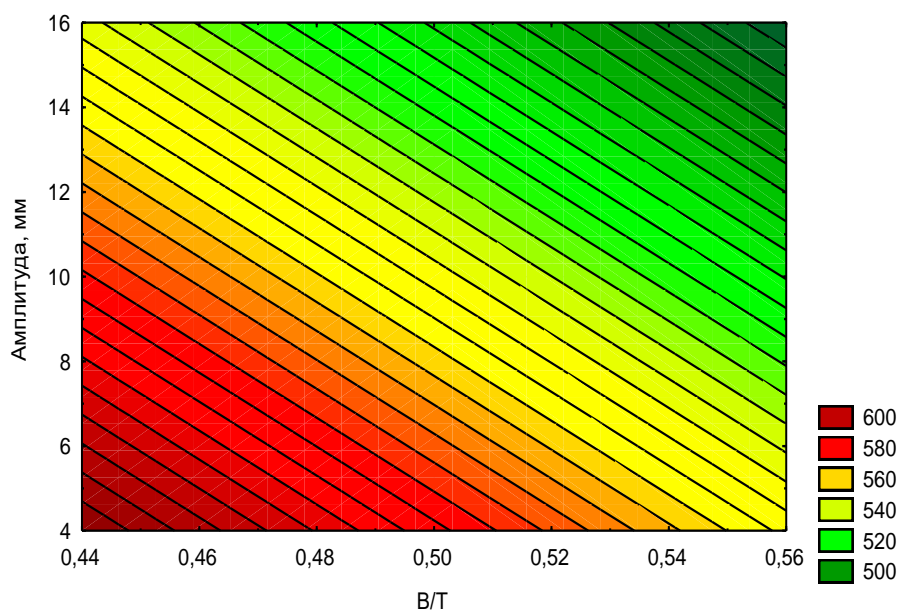


Рис. 7. Номограмма изменения плотности в зависимости от показателя В/Т и амплитуды ударов

2) определение оптимальной частоты ударов по технологии встряхивания. По номограмме амплитуда – частота по значению плотности и рекомендуемому значению амплитуды находится значение частоты ударов (рис. 8);

3) по результатам определения значений В/Т, амплитуды и частоты ударов возможно прогнозировать показатель прочности. Данный показатель определяется с использованием номограммы значение В/Т – амплитуда (рис. 9).

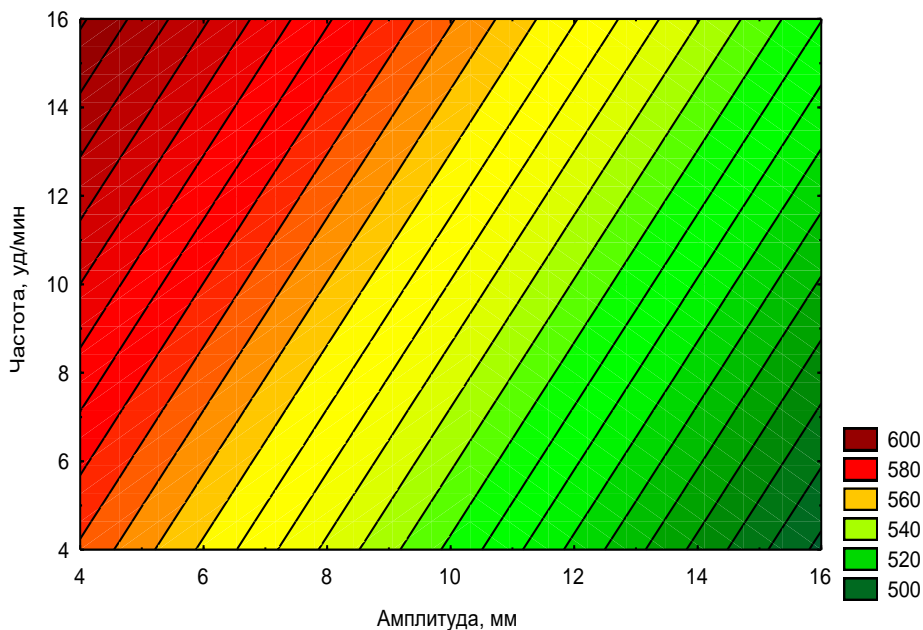


Рис. 8. Номограмма изменения плотности в зависимости от амплитуды и частоты ударов

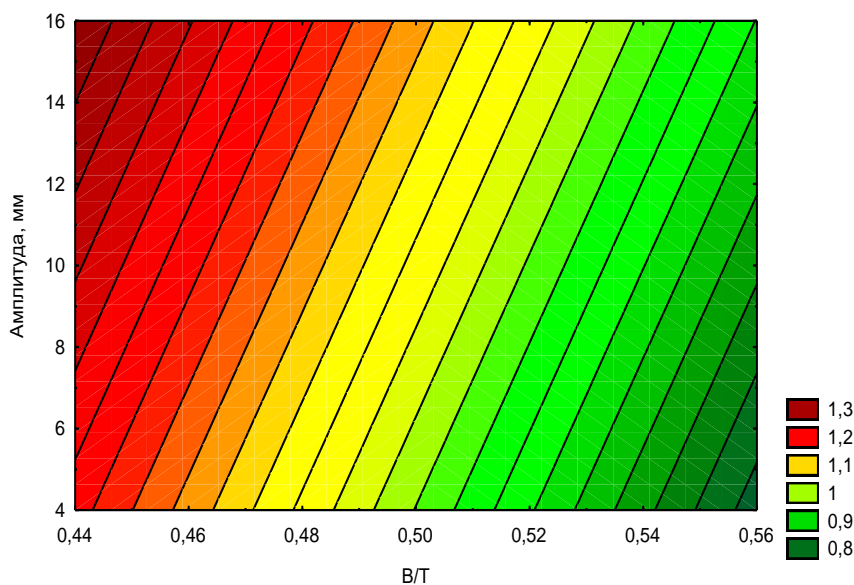


Рис. 9. Номограмма изменения прочности в зависимости от показателя В/Т и амплитуды ударов

Предлагаемая методика позволяет в зависимости от заданной плотности установить основные параметры этапа формирования ячеистых бетонов по технологии встряхивания – показатель В/Т, амплитуду и частоту ударов, а также найти прогнозируемый показатель прочности изготавливаемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство и применение ячеистобетонных изделий автоклавного твердения в Республике Беларусь / Т.Г. Голубева [и др.] // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26 – 28 мая 2010 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Стринко, 2010. – 148 с.

2. Установка для вспучивания ячеистобетонных смесей: пат. 5298 Респ. Беларусь на полезную модель / В.В. Бозылев, Е.В. Рядчиков, Д.Н. Шабанов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20080861; заявл. 20.11.2008; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3(68). – С. 202.
3. Бозылев, В.В. К вопросу повышения прочности ячеистых бетонов, полученных по технологии встряхивания / В.В. Бозылев, Е.В. Рядчиков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 83 – 88.
4. Бетоны. Методы определения плотности: ГОСТ 12730.1-78. – Введ. 01.01.80. – М.: М-во промышленности строительных материалов СССР, 1980. – 5 с.
5. Вознесенский, В.А. Математическая теория эксперимента и управления качеством композиционных материалов / В.А. Вознесенский. – Киев: Знание, 1979. – 28 с.

Поступила 10.11.2010

**RESEARCH OF MOLDING PROCESS PRODUCED BY SHAKING TECHNOLOGY
AT AERATED CONCRETE MANUFACTURING**

V. BOZYLEV, E. RIADCHIKOV

Survey of a current state of aerated concrete manufacturing in Republic of Belarus is resulted. Data on developed shaking technology are given at molding in aerated concrete manufacturing. The laboratory setup for mode definition of process conducting on shaking technology is presented. Results of determination of forming parameters with use of a method of experiment planning are presented. Statistic processing of results of experiment is carried out and adequate mathematical models of density and strength of a cellular concrete are gained. It is offered a technique, which allows to determine depending on the set density main parameters of forming process of cellular concrete using shaking technology – indicator W/C, amplitude and frequency of impacts, and also to find a predicted indicator of strength of output products.