

УДК 693.546.42

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АРБОЛИТА

*А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ, канд. техн. наук Ю.П. ГОЛУБЕВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены способы уплотнения бетонной смеси при изготовлении арболита. Проанализированы их возможности. С целью обеспечения высокой степени уплотнения предложен способ уплотнения бетонной смеси при приготовлении арболита. Этот способ обеспечивает горизонтальное расположение щепы в арболите, уменьшает дефекты структуры и увеличивает прочность на 20 % по сравнению с традиционно применяемым вибрированием с пригрузом. С использованием нового способа спланирован и реализован двухфакторный эксперимент с целью определения оптимальной частоты и амплитуды колебаний. Получена адекватная математическая зависимость, позволяющая прогнозировать прочность арболита, в зависимости от заданной амплитуды и частоты колебаний при уплотнении смеси. Определены скорость колебаний, ускорение и интенсивность колебаний – основные параметры, характеризующие вибрационное воздействие на бетонную смесь. Установлено, что оптимальная амплитуда на этапе горизонтальных колебаний равна 10 см, оптимальная частота – 1 Гц. Теоретически обоснован эффект направленного расположения заполнителя в арболите.

Введение. Одним из важных технологических переделов, оказывающих влияние на структурообразование и физико-механические свойства арболита, является стадия и, соответственно, режим уплотнения. Уплотняемость характеризует способность материала (тела) пластически деформироваться (сжиматься) под действием собственной массы и приложенного силового воздействия без нарушения структурной сплошности. Степень уплотнения влияет на такие свойства, как средняя плотность, деформативность и прочность [1].

Бетонная смесь для изготовления арболита представляет собой сыпучее тело, которое можно охарактеризовать как дискретную систему, включающую частицы древесины, связующее (цементное тесто), воду, в том числе внутри заполнителя, и воздух [2]. Древесный заполнитель, в отличие от цемента, не образует связанной системы при взаимодействии с водой. При вибрировании в бетонной смеси для изготовления арболита происходит два процесса: тиксотропное разжижение цементного геля и изменение пространственной упаковки зёрен древесного заполнителя. Ряд исследователей [3 – 5] рассматривают эти процессы отдельно, потому что параметры источника колебаний по-разному влияют на компоненты бетонной смеси. Ими предлагается вибрирование арболита вести с разной частотой для цементного геля и заполнителя соответственно. Другие авторы [6, 7] бетонную смесь для изготовления арболита рассматривают в виде непрерывной сплошной среды и предлагают вести вибрирование с одной частотой.

Бетонная смесь для изготовления арболита состоит на 75...90 % из древесного заполнителя, при этом древесина проявляет упругопластические свойства, смесь в процессе уплотнения также проявляет эти свойства. В этом случае для разжижения цементного геля требуются высокие частоты, а для компактной упаковки заполнителя необходима большая амплитуда колебаний вибратора [2]. Поскольку в арболитовой смеси древесный заполнитель связан между собой цементным гелем, то предполагается, что собственные колебания заполнителя возбуждаются колебаниями сольватированных частиц цемента. Но амплитуды колебаний сольватированных частиц цемента очень малы и они не могут ощутимо перемещать зёрна заполнителя, следовательно, для компактной упаковки заполнителя в арболитовой смеси определяющим параметром является не частота, а амплитуда колебаний.

В процессе уплотнения свойства формуемой смеси изменяются, она приобретает новую макроструктуру, предопределённую во многом выбранным способом уплотнения. Поэтому характер образования макроструктуры арболита может быть определён взаимодействием древесных частиц друг с другом.

Уплотнение бетонной смеси может осуществляться вибрационным методом, безвибрационным и комбинированным. К безвибрационному методу относятся прессование с фиксирующей крышкой, циклическое прессование (немедленная распалубка) и трамбование; к комбинированному – вибропрессование с пригрузом, вибропрессование с фиксирующей крышкой и силовой вибропрокат.

При использовании прессования с фиксирующей крышкой частицы древесного заполнителя сжимаются, вызывая упругие деформации, что приводит к распрессовке и в итоге к снижению конечной прочности. При циклическом вибропрессовании необходимо подбирать число циклов попеременного сжатия и удельное давление, которые зависят от фракций древесного заполнителя, толщины прессуемого изделия. При виброуплотнении с пригрузом частицы древесного заполнителя занимают в структуре арболита оптимальное положение, обеспечивающее наибольшую площадь контактных зон, при этом уменьшается редуформация. В таблице 1 представлены результаты опытов [1] при определении оптимальности уплотнённой структуры.

Таблица 1

Влияние способа уплотнения арболитовой смеси на относительные деформации и давление набухания арболита

Способы уплотнения	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Развиваемое давление набухания, МПа	Относительные деформации, мм/м
Циклическое прессование (немедленная распалубка)	648	2,48	0,91	4,3
Вибропрессование с пригрузом (немедленная распалубка)	647	2,51	0,73	4,1
Прессование с фиксирующей крышкой	650	2,45	0,98	4,8

Из таблицы 1 видно, что вибропрессование с пригрузом – наиболее эффективный способ для уплотнения арболитовой смеси. Частицы древесного заполнителя, перемещаясь одна относительно другой, занимают в структуре арболита оптимальное положение, обеспечивающее наибольшую площадь контактных зон, при этом уменьшается редеформация. Также в таблице 1 показано оптимальное давление, создаваемое пригрузом 0,02 МПа. Однако вибропрессование с пригрузом не может обеспечить больших амплитуд, необходимых для упругопластических смесей.

Целью исследований явилась разработка способа уплотнения бетонной смеси для изготовления арболита, позволяющего исключить недостатки вышеперечисленных способов.

Основная часть. Теоретически обосновать необходимость воздействия на арболитовую смесь колебательного движения с большой амплитудой можно следующим образом: будем считать, что ориентация объектов (щепы) в заданном направлении происходит в результате перехода объекта из вертикального положения в горизонтальное. Этот переход возможен при приложении к системе горизонтального квазигармонического воздействия. Такое упорядочивание можно объяснить, рассматривая одиночный объект, находящийся в начальный момент в крайнем вертикальном положении. Проведём качественные оценки факторов, воздействующих на этот объект.

1. Пусть объект находится в вертикальном положении и нижней гранью опирается на нижележащий слой (в предельном случае на дно формы). Форма движется по закону:

$$x = A \cdot \sin \omega t; \quad (1)$$

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t; \quad (2)$$

$$a = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t, \quad (3)$$

где x – смещение колеблющейся величины от положения равновесия, м; v – скорость формы, м/с; a – ускорение формы, м/с²; A – амплитуда колебаний, м; ω – круговая частота колебаний, рад/с; t – время, с.

То есть система отсчёта, связанная с формой, является неинерциальной, так как движется с ускорением. Тогда действие этой системы на объект, находящийся в ней, можно учесть с помощью введения фиктивной силы инерции $F_{ин}$ (рис. 1):

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}, \quad (4)$$

$$F_{ин} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t, \quad (5)$$

где m – масса объекта (щепы), кг.

Действие этой силы, приложенной к центру масс C объекта, приводит к выведению его из состояния равновесия, так как нарушаются оба условия равновесия:

$$\sum \vec{F}_i \neq 0; \quad (6)$$

$$\sum \vec{M}_i \neq 0, \quad (7)$$

где $\sum \vec{F}_i$ – сумма всех сил, действующих на объект; $\sum \vec{M}_i$ – сумма моментов сил, действующих на объект.

Под действием силы инерции возникает нескомпенсированный вращающий момент относительно точки O (рис. 2). Состояние объекта в начальном положении было неустойчивым, т.е. при малом отклонении от этого положения возникают моменты,

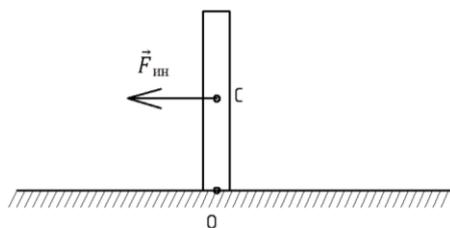
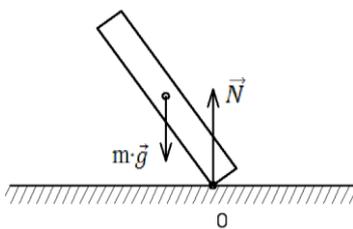


Рис. 1. Опираение объекта на дно формы

Рис. 2. Отклонение объекта от положения равновесия
 $m \cdot \vec{g}$ – вес тела, Н; \vec{N} – сила реакции опоры, Н

препятствующие возвращению его в начальное состояние, даже если внешнее воздействие прекратилось (форма при движении проходит среднее положение: $a = 0 \rightarrow F_{ин} = 0$). Таким образом, объект опрокидывается и занимает горизонтальное положение.

Максимальное значение силы инерции будет определяться по формуле:

$$F_{ин} = m \cdot A \cdot \omega^2. \quad (8)$$

2. Рассмотрим взаимодействие объекта с другими окружающими его объектами. Очевидно, что при движении имеют место столкновения объектов. Эти столкновения являются неупругими, поэтому для их описания используем закон сохранения момента импульса (рис. 3):

$$m \cdot v \cdot L = I \cdot \omega_2, \quad (9)$$

где L – длина объекта, m ; I – момент инерции объекта 2, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ω_2 – начальная угловая скорость, с которой будет осуществляться движение объекта 2 после взаимодействия.

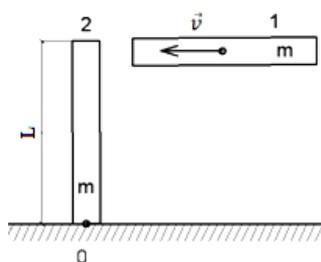


Рис. 3. Взаимодействие объекта с другими объектами

После столкновения объекта 1 с объектом 2 последний станет двигаться с угловой скоростью ω_2 и займёт горизонтальное положение.

Два анализируемых случая объясняют упорядочивание рассматриваемой системы в направлении горизонтального силового воздействия.

Для подтверждения теоретических выводов разработана экспериментальная лабораторная установка (рис. 4).

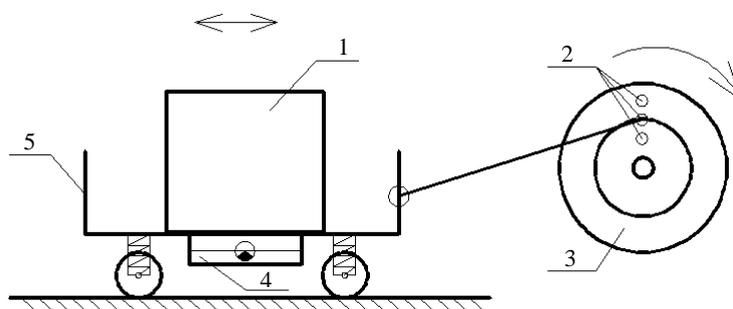


Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки для уплотнения бетонной смеси при приготовлении арболита:
1 – форма для образца $20 \times 20 \times 20$ см; 2 – места крепления шатуна для разной амплитуды;
3 – двигатель; 4 – вибратор; 5 – тележка

Установка позволяет провести двухэтапное уплотнение.

На первом этапе смесь в форме подвергается горизонтальным колебаниям, которые должны обеспечить упорядочивание структуры крупного заполнителя. Для регулирования амплитуды изменяли радиус закрепления приводного кривошипно-шатунного механизма.

На втором этапе форма подвергалась виброуплотнению с пригрузом. Данное воздействие обеспечивает тиксотропное разжижение цементного теста.

Уплотнение бетонной смеси производилось в следующей последовательности:

- бетонная смесь укладывалась в форму 1;
- включался двигатель 3, и тележка 5 с формой 1 совершала горизонтальные колебания;
- двигатель 3 выключался, когда смесь занимала горизонтальное положение и заполняла углы формы;
- включался вибратор 4 и производилось вибрирование с пригрузом 0,02 МПа в течение 30 с.

Исследования проводились на образцах размером $20 \times 20 \times 20$ см, сформированных из щепы смешанных пород, согласно требованиям ГОСТ 19222-84.

Использовался цемент Кричевского завода марки ПЦ500-Д0.

Арболитовая смесь имела следующий состав:

- расход цемента – 410 кг/м^3 ;

- расход щепы – 290 кг/м^3 ;

- В/Ц = 1,1;

- расход добавки хлористого кальция составлял 2 % от массы цемента.

Образцы подвергались термовлажностной обработке по следующему режиму:

- подъём температуры $10 \text{ }^\circ\text{C}$ в час;

- выдержка в течение 6 часов при температуре $55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для оценки эффективности двухэтапного уплотнения арболитовой смеси параллельно изготавливались образцы арболита, которые уплотнялись традиционным способом вибрирования с пригрузом в течение 30 секунд. Средняя прочность данных образцов составляла $3,5 \text{ МПа}$.

Исследование двухэтапного уплотнения арболитовой смеси выполнялось с использованием статистических методов планирования эксперимента.

Реализован двухфакторный эксперимент. В качестве исследуемых факторов приняты амплитуда и частота колебаний.

В таблице 2 представлены уровни варьирования изучаемых факторов.

Таблица 2

Уровни варьирования исследуемых факторов

Наименование факторов	Обозначение факторов	Уровни варьирования		
		верхний +1	основной 0	нижний –1
Амплитуда, см	X_1	15	10	5
Частота, Гц	X_2	3	2	1

Результаты эксперимента по оптимизации исследуемых параметров представлены в таблице 3.

Таблица 3

План реализации эксперимента

№ п/п	Нормализованные значения факторов		Натуральные значения факторов		
	X_1	X_2	Амплитуда, см	Частота, Гц	Прочность, МПа
1	–	–	5	1	3,50
2	+	+	15	3	3,65
3	0	0	10	2	3,90
4	–	0	5	2	3,58
5	–	+	5	3	3,52
6	0	–	10	1	4,1
7	0	+	10	3	3,87
8	+	–	15	1	3,69
9	+	0	15	2	3,7

После обработки результатов эксперимента по методике [8] получено уравнение связи исследуемых факторов:

$$Y = 3 + 0,24X_1 - 0,25X_2 - 0,01X_1^2 + 0,05X_2^2. \quad (10)$$

На рисунке 5 изображена поверхность отклика зависимости прочности от частоты и амплитуды колебаний.

Степень корреляции опытных данных с расчётными значениями иллюстрируют таблица 4 и рисунок 6. Средняя относительная погрешность составляет 1,4 %.

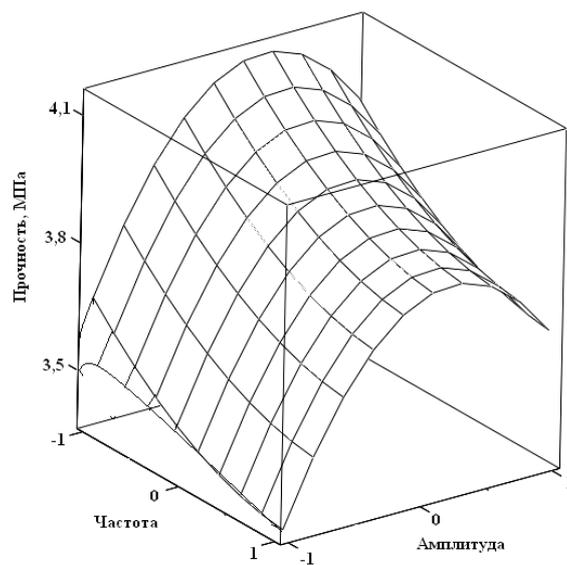


Рис. 5. Поверхность отклика исследуемых факторов

Таблица 4

Сравнение расчётных и экспериментальных значений прочности арболита

Прочность, МПа		
Расчётные значения	Экспериментальные значения	Относительная погрешность, %
3,55	3,50	-1,43
3,64	3,65	0,41
3,93	3,90	-0,64
3,61	3,58	-0,74
3,59	3,52	0,74
4,03	4,1	1,63
3,91	3,87	-1,08
3,76	3,69	-1,81
3,65	3,7	1,40

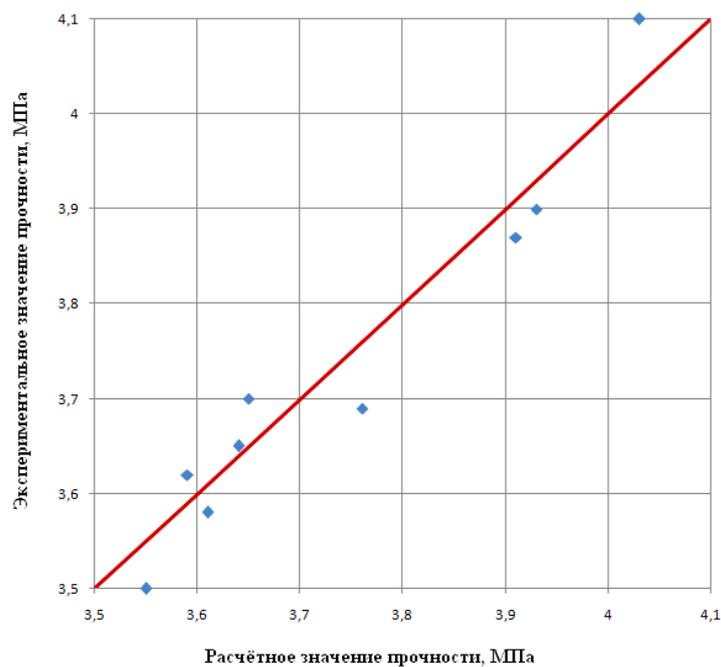


Рис. 6. Отклонение расчётных и опытных значений прочности арболита

Получена адекватная математическая зависимость, позволяющая прогнозировать прочность арболита при горизонтальном уплотнении, зная амплитуду и частоту колебаний. Адекватность подтверждена значениями критериев Стьюдента и Фишера. Кроме того, важными характеристиками степени уплотнения являются производные частоты и амплитуды колебаний [9]. К ним относятся: путь (V), совершаемый колеблющейся частицей в единицу времени, т.е. скорость колебаний – произведение амплитуды (A) на частоту колебаний (f); ускорение колебаний (a) – $a = A \cdot f^2$; интенсивность колебаний (I) – произведение скорости колебаний на ускорение колебаний ($\text{см}^2/\text{с}^3$).

Отмечается [4 – 7; 9], что достаточно надёжно характеризует вибрационное воздействие интенсивность колебаний. Каждой бетонной смеси соответствует своё оптимальное значение интенсивности вибрации. Оптимальные значения интенсивности вибрации могут колебаться от 80 до 300 $\text{см}^2/\text{с}^3$ [9]. Значение интенсивности увеличивается с увеличением жёсткости смеси.

В таблице 5 представлены значения производных параметров частоты и амплитуды колебаний.

Таблица 5

Параметры, характеризующие вибрационное воздействие на арболитовую смесь

Амплитуда, см	Частота, Гц	Скорость колебаний, см/с	Ускорение колебаний, $\text{см}/\text{с}^2$	Интенсивность колебаний, $\text{см}^2/\text{с}^3$	Максимальное значение силы инерции щепы, Н
5	1	5	5	25	0,0075
15	3	45	135	6075	0,2025
10	2	20	40	800	0,0600
5	2	10	20	200	0,0300
5	3	15	45	675	0,0675
10	1	10	10	100	0,0150
10	3	30	90	2700	0,1350
15	1	15	15	225	0,0225
15	2	30	60	900	0,0900

Анализируя данные, представленные в таблицах 3 и 5, можно сделать следующие выводы:

- при амплитуде 5 см и частоте 1 Гц при горизонтальном уплотнении арболитовая смесь не заполняет углы формы, наблюдаются дефекты структуры (рис. 7; 8, а, б), значение интенсивности при этом не попадает в диапазон оптимальных значений, прироста прочности не наблюдается;

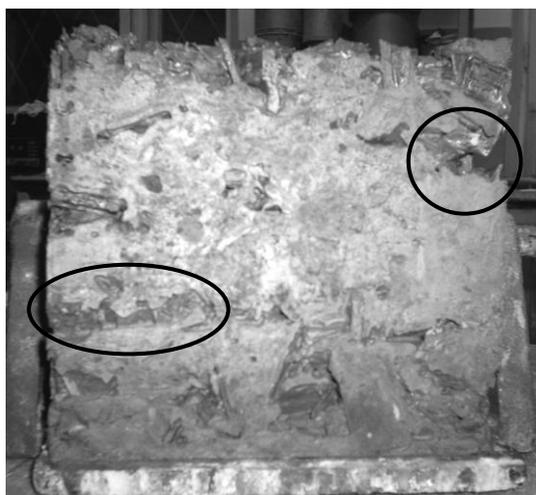


Рис. 7. Дефекты структуры в образце 20 × 20 × 20 см

- при амплитуде 5 см и частоте 2 Гц при горизонтальном уплотнении заполняемость углов формы улучшается, интенсивность попадает в диапазон оптимальных значений, щепы в целом распределяется горизонтально, прирост прочности составляет 2,5 %;

- при амплитуде 5 см и частоте 3 Гц при горизонтальном уплотнении наблюдается перемещение смеси по форме (рис. 8, в), интенсивность превышает оптимальные значения, прироста прочности практически не наблюдается;

- при амплитуде 10 см и частоте 1 Гц при горизонтальном уплотнении наблюдается полное заполнение углов формы, отсутствие дефектов структуры, щепа ориентируется горизонтально (рис. 8, г, рис. 9), интенсивность попадает в диапазон оптимальных значений, прочность в эксперименте достигла максимального значения 4,1 МПа, что на 20 % выше, чем при обычном вибрировании с пригрузом;

- при амплитуде 10 см и частоте 2...3 Гц при горизонтальном уплотнении наблюдается перемещение смеси по форме (см. рис. 8, в), интенсивность превышает оптимальные значения, прирост прочности составляет 11,5 %;

- при амплитуде 15 см и частоте 1 Гц при горизонтальном уплотнении арболитовая смесь не полностью заполняет углы формы, интенсивность попадает в диапазон оптимальных значений, прирост прочности составляет 5,5 %;

- при амплитуде 15 см и частоте 2...3 Гц при горизонтальном уплотнении наблюдается перемещение смеси по форме (см. рис. 8, в), интенсивность превышает оптимальные значения, прирост прочности составляет 6 и 4 % соответственно.

Выполненный анализ свидетельствует о том, что оптимальными являются амплитуда, равная 100 мм, и частота 1 Гц.

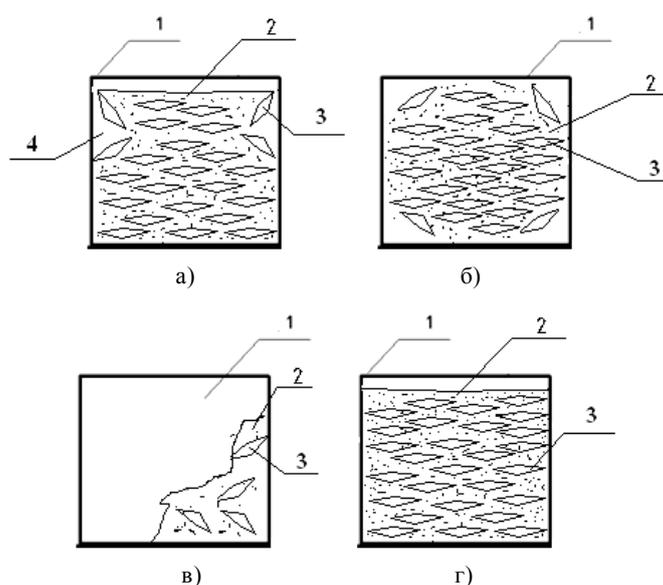


Рис. 8. Расположение смеси после горизонтальных колебаний

а – воздушные прослойки в бетонной смеси (вид сбоку); б – смесь не заполняет углы формы (вид сверху);

в – расположение смеси при высоких частотах горизонтальных колебаний (вид сбоку);

г – расположение смеси при оптимальной частоте и амплитуде горизонтальных колебаний (вид сбоку).

1 – форма для образца $20 \times 20 \times 20$ см; 2 – бетонная смесь для изготовления арболита; 3 – щепа; 4 – воздушная прослойка



Рис. 9. Образец $20 \times 20 \times 20$ см при оптимальной частоте и амплитуде горизонтальных колебаний

Заключение. Разработанный способ уплотнения, обеспечивает горизонтальное расположение щепы в арболите, уменьшение дефектов структуры и увеличение прочности арболита на 20 % по сравнению с традиционным вибрированием с пригрузом.

Теоретически доказана осуществимость метода. Раскрыт механизм взаимодействия частиц древесного заполнителя, занимающего горизонтальное положение при определённых силовых воздействиях.

Выполнено экспериментальное исследование, подтверждающее теоретические выводы, определены оптимальные параметры, обеспечивающие максимальный прирост прочности: амплитуда 100 мм, частота 1 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1990. – 415 с.
2. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона / Р. Лермит. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архит., 1959. – 296 с.
4. Десов, А.Е. Вибрированный бетон / А.Е. Десов. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архит., 1949. – 230 с.
5. Овчинников, П.Ф. О механизме виброуплотнения строительных смесей / П.Ф. Овчинников, Е.Д. Кузьмин // Структура, прочность и деформации бетонов: сб. НИИЖБ Госстроя СССР. – М., 1966.
6. L’Hermite, R. Französische Vorschungen über das Rütteln des Betons / R. L’Hermite // Die Bautechnik. Вг. 1959, Н. 2.
7. Гириштель, Г.Б. О физической природе вибрационного воздействия на уплотняемые смеси / Г.Б. Гириштель // Технология бетона и железобетонных конструкций: сб. – Киев, 1972.
8. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 328 с.
9. Мазовский, В.В. Формирование изделий. Особенности уплотнения бетонных смесей / В.В. Мазовский // Строительство и недвижимость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2003/19/sn31920.html>. – Дата доступа: 19.11.2009.

Поступила 27.11.2009