

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ В ЦЕМЕНТСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМАХ

Лукьянченко М.А., к.т.н., доцент, Прудко О.В., магистрант

Национальная академия природоохранного и курортного строительства

В статье описываются теоретические исследования и экспериментальные данные о влиянии ультразвуковой кавитации на активацию цементной суспензии. Показывается, что кавитация в водно-цементных системах – сложный механический и физико-химический процесс, одним из которых является диспергирование частиц цемента. Устанавливается на основе релаксационной теории взаимосвязь между основными параметрическими характеристиками источника ультразвука и цементной суспензии. На основе анализа литературы показывается, что при кавитационной ультразвуковой обработке, кроме диспергирования, проявляются следующие физико-химические параметры: ускорение диффузии и массообмена на границе цемент – вода. **Ультразвук, кавитация, коэффициент поглощения ультразвука, коэффициент вязкости**

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития капитального строительства и улучшения качества выпускаемой продукции является интенсификация технологических процессов. Все большее место в технологии производства строительных материалов и изделий занимает активация цемента. Одним из методов значительного ускорения реакционных процессов и процессов обработки является применение упругих колебаний ультразвукового диапазона частот (> 20000 колебаний в секунду). Однако в технологии производства различных бетонов при активации цемента ультразвук (в режиме кавитации) достаточного применения еще не получил. Это связано, главным образом, с двумя причинами:

- не достаточно изучена теория явлений ультразвуковой кавитации;
- не созданы надежные и экономичные технологические установки.

Известно, что одним из основных путей повышения прочности цементного камня и, соответственно, бетона является:

- повышение удельной поверхности цемента (до определенного предела);
- оптимизация гранулометрического состава.

Необходимо отметить, что цемент является наиболее дорогостоящей частью бетона и его качество предопределяет, в частности, качество бетона, как материала и, изготовленной из него конструкции в целом. Поэтому требования к качеству цемента всегда оставались очень высокими.

По сообщениям Государственной службы статистики в Украине в 2011 году было произведено 10,515 млн. тонн цемента, что на 11,2 % превысило показатель 2010 года, и последний раз рост производства цемента отмечался в 2007 году на уровне 9,1 % к 2006 году. Несмотря на такие показатели, цемент продолжает оставаться остродефицитным, высоко востребованным материалом. Таким образом, задача лучшего использования цемента за счет улучшения его качественных показателей может сократить его расход и приведет к существенной экономии.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Кавитационный процесс, основанный на ультразвуковом методе активации водцементных суспензий, характеризуется сложностью и многофакторностью физико-химических явлений, происходящих в районе кавитационной полости [1, 2].

Первая же работа, в которой изложено влияние ультразвуковой вибрации на формирование цементного камня, была работа Х. Мауса в 1958 г. Дальнейшее развитие данного направления нашло в работах И.Н. Ахвердова, М.А. Шалимо, Зубрилова С.П., Плющ Н.А, Долгополова И.М., Капустина А.П. и др. исследователей. Первая лабораторная

установка с гидродинамическим ультразвуковым излучателем для активации цемента была создана в ДИСИ в 1964 г. В.Г. Винником.

Интерес к ультразвуковой технологической обработке цементных суспензий вызван тем, что с помощью ультразвука можно произвести воздействие на систему, с обеспечением неравновесного состояния, которое сохраняется длительное время. В течение этого времени происходит более полная гидратация цементной суспензии и, в дальнейшем, в процессе твердения ведет к улучшению структуры цементного камня в бетоне.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является:

- выявить некоторые закономерные особенности влияния ультразвуковой кавитации при обработке цементной суспензии на качество бетонной смеси;
- определить влияние и взаимосвязь технологических параметров лабораторной ультразвуковой установки УЗТА-0,8/22-ОМ с параметрами водоцементной суспензии.

Цель работы предопределяется производственными потребностями, которые ставят следующие задачи исследований:

- разработка эффективных источников ультразвуковых колебаний;
- определение оптимальных технологических параметров создания ультразвуковой кавитации в суспензиях;
- обеспечение обработки больших объемов рабочих смесей в короткое время.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика исследований состоит из двух составляющих:

- на основе анализа существующих публикаций и научно-технических разработок определение основных технологических факторов ультразвуковых установок и степени их влияния на распространение кавитационного процесса в водоцементной суспензии;
- проведение контрольных стандартных экспериментов на лабораторной установке УЗТА-0,8/22-ОМ с определением степени влияния выявленных технологических параметров на значение предела прочности на сжатие бетонных образцов.

В работах [2, 3] показано, что наиболее эффективным, с точки зрения механического воздействия (диспергирования) на цементную суспензию, является воздействие низкими частотами ультразвуковых колебаний (1000÷20000 Гц).

Считается, что кавитационные процессы являются решающими в процессе диспергирования, т.к. интенсивное разрушение твердой фазы суспензии происходят в пучности давления ультразвукового поля [1,2]. При этом диспергирование принимается как трехстадийный процесс:

- разрушение флоккул цемента;
- адсорбционного диспергирования твердой фазы в суспензии;
- химического диспергирования твердой фазы в суспензии.

С точки зрения технологии производства бетона, одним из главных технологических параметров, влияющих на распространение кавитационного процесса в цементной суспензии и на прочность бетона, является водоцементное отношение (B/C). С точки зрения источника ультразвуковых колебаний, используемого для получения кавитационного эффекта в водоцементных суспензиях, основным технологическим показателем, на наш взгляд, является интенсивность ультразвука.

По данным различных исследователей [4-6] кавитационный порог для воды (т.е. минимальная интенсивность ультразвука при которой начинает проявляться кавитационный эффект) для частоты в 20 кГц составляет в среднем $3 \div 7 \frac{Вт}{см^2}$.

Кавитационный порог для цементной суспензии (I_C) теоретически можно определить из уравнения, приведенного в работе [4], описывающей амплитуду звукового давления P в зависимости от интенсивности ультразвука в воде (кавитационного порога для воды (I_B)):

$$P = \frac{1}{981} \cdot \sqrt{20 \cdot I_B} \cdot \rho \cdot c, \quad (1)$$

где: P - амплитуда звукового давления, am ;

ρ - плотность среды, $\frac{\Gamma}{\text{см}^3}$, (для воды $\rho = 0,998 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$);

I_B - интенсивность, $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$;

c - скорость распространения ультразвука, $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$, (для воды $c_B = 1430 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$).

Решая уравнение (1) относительно интенсивности и, заменяя характерные показатели для воды, на показатели для цементной суспензии получим:

$$I_C = \frac{981^2 \cdot P^2}{20 \cdot \rho_C \cdot c_C} = 4800 \cdot \frac{1}{\rho_C \cdot c_C}, \quad (2)$$

где: ρ_C - плотность суспензии:

$$\rho_C = \rho_B \cdot \psi + \rho_{\text{ц}} \cdot (1 - \psi), \quad (3)$$

где: ψ - доля воды в суспензии;

$\rho_{\text{ц}}$ - истинная плотность цемента, принимаемая предварительно: $\rho_{\text{ц}} = 3100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

c_C - скорость распространения ультразвука в цементной суспензии:

$$c_C = \sqrt{\frac{1}{K_C \cdot \rho_C}}, \quad (4)$$

где: K_C - коэффициент сжимаемости цементной суспензии.

Сжимаемость цементной суспензии мало изучена. Она, на наш взгляд, зависит от реологических свойств суспензии: структурной прочности твердой и жидкой фазы суспензии и их совместных новообразований. Коэффициент сжимаемости воды: $K_B = 4,7 \cdot 10^{11}$.

Для определения коэффициента сжимаемости цементных зерен применяем методику, приведенную в работе [7] для определения такого коэффициента для твердых тел:

$$\frac{\sum V_1 - \sum V_2}{\sum V_1} = \varepsilon(1 - 2 \cdot \mu), \quad (5)$$

где: $\sum V_1$ - первоначальный объем цементных зерен;

$\sum V_2$ - объем цементных зерен после приложения давления;

ε - относительная продольная деформация: по закону Гука - $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$;

μ - коэффициент Пуассона: $\mu = 0,18$;

E - модуль упругости цементных зерен: условно принимаем равным модулю упругости бетона - $E = 0,2 \times 10^5$ МПа.

Т. к коэффициент сжимаемости равен относительному изменению объема при изменении давления на 0,1 МПа, тогда по формуле при $\sigma = 0,1$ МПа:

$$K_C = \frac{1}{0,2 \times 10^5} \cdot (0,1 - 2 \times 0,18) = 0,32 \times 10^{-6}.$$

Общую сжимаемость цементной суспензии K_C определяем по уравнению, приведенному в работе [2]:

$$K_C = K_B \cdot \psi + K_{\text{ц}} \cdot (1 - \psi). \quad (6)$$

Доля воды в суспензии составляет ψ : $\psi = \frac{B}{\text{Ц}} : \left(1 + \frac{B}{\text{Ц}}\right)$. Тогда, подставляя это выражение в формулы: (3) и (6):

$$\rho_C = \rho_B \cdot \frac{\frac{B}{\text{Ц}}}{1 + \frac{B}{\text{Ц}}} + \rho_{\text{ц}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B}{\text{Ц}}}, \quad (7)$$

$$K_C = K_B \cdot \frac{\frac{B}{\text{Ц}}}{1 + \frac{B}{\text{Ц}}} + K_{\text{ц}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B}{\text{Ц}}}. \quad (8)$$

Определяем скорость распространения ультразвука в цементной суспензии c_C в зависимости от $\frac{B}{\text{Ц}}$, поставляя (7) и (8) в формулу (4):

$$c_C = \left(1 + \frac{B}{\text{Ц}}\right) \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{10}{\left(32 + 4,7 \frac{B}{\text{Ц}}\right) \cdot \left(\rho_{\text{ц}} + \rho_B \cdot \frac{B}{\text{Ц}}\right)}}. \quad (9)$$

Тогда, выражение для кавитационного порога в цементной суспензии при различных значениях $\frac{B}{\text{Ц}}$:

$$I_C = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{32 + 4,7 \cdot \frac{B}{\text{Ц}}}{\rho_{\text{ц}} + \rho_B \cdot \frac{B}{\text{Ц}}}}. \quad (10)$$

Теоретическое и экспериментальное подтверждение уравнения (10) приведены в работе [1].

На основе релаксационной теории поглощения ультразвуковых волн, разработанной академиками Л.И. Мандельштамом и М.А. Леонтовичем [7], профессор Зубрилов С.П. [1] предлагает формулу для определения коэффициента поглощения ультразвука в суспензии в следующем виде:

$$\alpha = 5,2 \times 10^{-17} \times \eta \cdot \frac{\left(32 + 4,7 \frac{B}{C}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\rho_{\text{ц}} + \rho_{\text{в}} \frac{B}{C}\right)}{\left(1 + \frac{B}{C}\right)^2}, \quad (11)$$

где: η - сдвиговая (структурная) вязкость.

В работах профессора Зубрилова С.П. [1] на основании анализа данных, полученных А.Б. Десовым [8], построены графики зависимости структурной вязкости от $\frac{B}{C}$ при различных амплитудах вибрирования цементов с тонкостью помола $3000 \div 4000 \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$ (рис. 1).

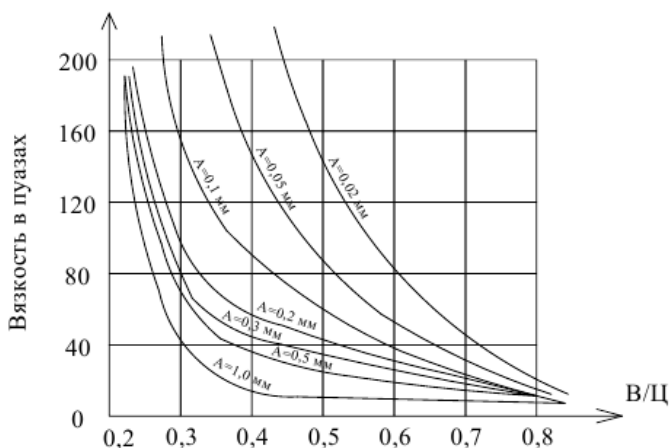


Рис. 1. Зависимость структурной вязкости η от B/C при различных амплитудах вибрирования

Однако, как отмечается многими авторами [1, 2, 8] вязкость цементной суспензии η зависит не только от $\frac{B}{C}$ и амплитуды колебаний. Она, кроме этого, зависит:

- частоты колебаний;
- температуры суспензии;
- наличие поверхностно активных добавок и т.д.

Поэтому аналитически можно отметить, что фактическая вязкость суспензии, обрабатываемая ультразвуком, будет ниже, чем на графике (рис. 1). Это можно объяснить следующими показателями:

- при ультразвуковой обработке температура суспензии растет, а вязкость, соответственно, уменьшается;
- при наличии добавок и пластификаторов пластичность суспензии возрастает, а вязкость падает;
- с увеличением частоты ультразвука вязкость незначительно увеличивается.

В процессе распространения плоских ультразвуковых волн в вязкой среде исходная интенсивность ультразвука (I_0) уменьшается по мере удаления от источника излучения согласно формуле:

$$I_0 = I_c \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}, \quad (12)$$

где: I_c - кавитационный порог для суспензии, определяется по формуле (10), $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$;

α - коэффициент поглощения ультразвука, определяется по формуле (11), $\left(\frac{1}{\text{см}}\right)$;

x - расстояние от излучателя до точки с интенсивностью I_c , см;

e - основание натурального логарифма.

Решив, уравнение (12) получаем зависимость исходной интенсивности относительно (рис. 2, 3):

x - толщины обрабатываемого слоя;

$\frac{B}{C}$ - водоцементного отношения.

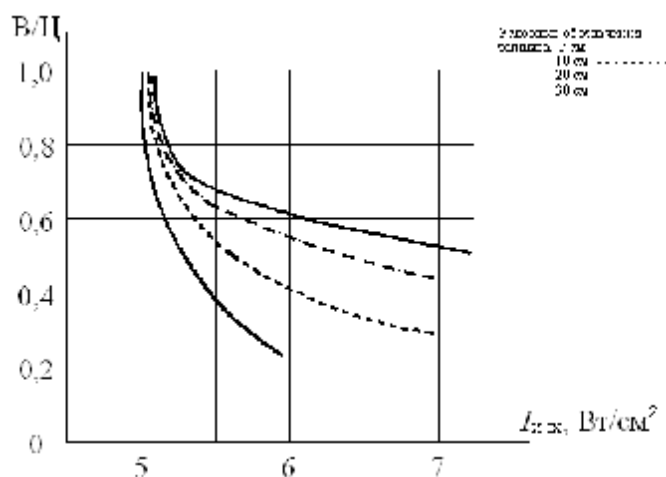


Рис 2. Зависимость необходимой исходной интенсивности излучателя ультразвука от В/Ц при различной толщине обрабатываемого слоя

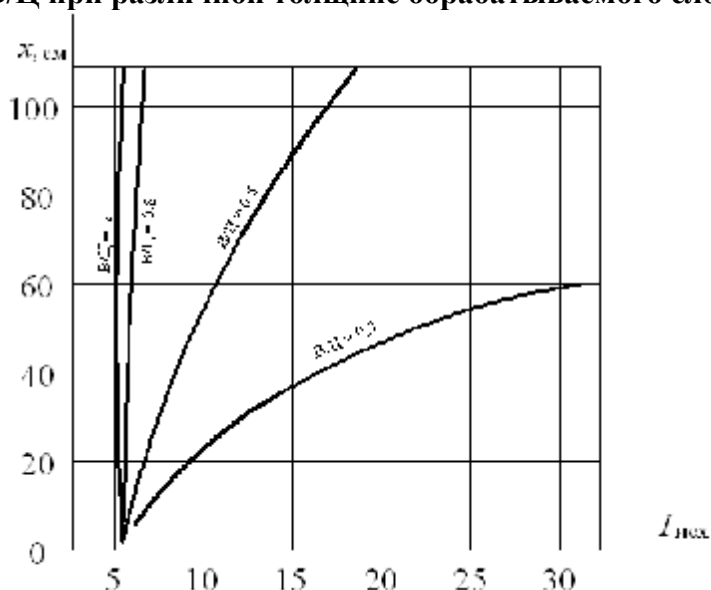


Рис 3. Зависимость исходной интенсивности излучателя от толщины обрабатываемого слоя водоцементной суспензии при различных В/Ц

Анализируя графики на рис. 2 и 3 видно, что исходная интенсивность сильно возрастает при $\frac{B}{C} \leq 0,5$. Однако, следует отметить, что исходная интенсивность распределяется по поверхности излучателя неравномерно, что отмечено в работах [1, 2, 10]. Поэтому, если ставить задачу получения средней интенсивности излучателя в экспериментальной установке $I_0 = 3 \frac{B_T}{\text{см}^2}$, то исходная интенсивность в центре будет $I_0 = 7 \frac{B_T}{\text{см}^2}$, а у самого края излучателя $I_0 = 0$.

Решая уравнение (12) относительно следующих исходных паспортных данных для лабораторного излучателя УЗТА-0,8/22-ОМ: $I_0 = 10 \frac{B_T}{\text{см}^2}$; $\alpha = 0,12$; $I_C = 3 \frac{B_T}{\text{см}^2}$, получаем толщину обрабатываемого слоя $x = 20$ см. Тогда общий объем квитирующей суспензии, при диаметре рабочего инструмента лабораторного излучателя УЗТА-0,8/22-ОМ $d = 3.5$ см будет составлять 200 см^3 (200 мл).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Экспериментальные исследования разбивались, условно, на две партии:

- сравнение предела прочности бетонных образцов, изготовленных из активированных ультразвуком суспензий, при максимальной мощности установки

$I_0 = 10 \frac{B_T}{\text{см}^2}$ с прочностью контрольных образцов без активации;

- сравнение предела прочности бетонных образцов, изготовленных из активированных ультразвуком суспензий, при регулировании интенсивности установки, температуры суспензии и времени активации с прочностью контрольных образцов без активации.

Результаты испытаний опытных образцов сведены в табл. 1, 2. В табл. 1 номера серий 1÷3 – контрольные образцы, выполненные без активации. В табл. 2 номера серий 1÷6 – контрольные образцы, выполненные без активации.

Таблица 1

Результаты испытания опытных образцов при следующих технологических параметрах:

$$\frac{B}{C} = 0,5; I_0 = 10 \frac{B_T}{\text{см}^2}; t = 120 \text{ сек}$$

Состав, г	№ серии	$R_{\text{сж}}, \text{ кгс}$	$R_{\text{сж}}, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$R_{\text{сж}}^{\text{ср}}, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
Ц=500 П=1500 В=210	1	5180	207,2	194,73
		5250	210	
	2	4520	180,8	
		3750	150	
	3	5090	203,4	
		5420	216,8	
Ц=315 П=1500 В=117	4	4720	188,8	162,40
		4700	188	
	5	4520	180,8	
		3200	128	
	6	4020	160,8	
		3200	128	

Ц=350 П=1500 В=225	7	4920	196,8	173,07
		4600	184	
	8	3000	120	
		4600	184	
	9	4340	173,6	
		4500	180	
Ц=400 П=1500 В=160	10	4330	173,2	187,47
		4040	161,6	
	11	4430	177,2	
		4920	196,8	
	12	5280	211,2	
		5120	204,8	

Таблица 2

Результаты испытания опытных образцов при регулировании технологических параметров

Интенсивность, $\frac{Вт}{см^2}$	Время активации, сек	Температура суспензии, °С	№ серии	$R_{сж}$, кгс	$R_{сж}$, $\frac{кгс}{см^2}$	$R_{сж}^{ср}$, $\frac{кгс}{см^2}$	Прирост прочности, %
1	2	3	4	5	6	7	8
--	--	17	1	5900	236	204,4	--
			2	5300	212		
			3	4900	196		
			4	6500	260		
			5	3200	128		
			6	0	0		
10	15	23	7	7200	288	250,6 7	22,6
			8	6400	256		
			9	5200	208		
	30	28	10	6700	268	274,6 7	34,4
			11	6700	268		
			12	7200	288		
	45	34	13	7600	304	286,6	40,2
			14	7100	284		
			15	6800	272		
5	15	21	16	6600	264	245,3	20,0
			17	6100	244		
			18	5700	228		
	30	24	19	5700	228	262,7	28,5
			20	7500	300		
			21	6500	260		
	45	28	22	6700	268	285,3	39,6
			23	7000	280		
			24	7700	308		

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает:

- при максимальном значении интенсивности $I_0 = 10 \frac{Вт}{см^2}$ и времени обработке суспензии ультразвуком $t = 120 \text{ сек}$ и без контроля температуры нагрева суспензии наблюдалось падение прочности испытываемых образцов по сравнению с контрольными образцами до 20 %;

- при контроле температуры суспензии (в пределах от 21°C до 34°C) и регулировании интенсивности лабораторной установки даже при незначительном времени кавитации в пределах от 15 до 45 сек, отмечается прирост прочности испытываемых образцов до 40 %.

ВЫВОДЫ

1. Теоретические исследования и экспериментальные данные показывают значительное влияние ультразвуковой кавитации на активацию цементной суспензии. Кавитация в водно-цементных системах – сложный механический и физико-химический процесс, одним из которых является диспергирование частиц цемента. Этот процесс является трех стадийным:

- разрушение флоккул цемента;
- адсорбционного диспергирования твердых частиц в воде;
- химического диспергирования твердых частиц в воде.

2. Установлена на основе релаксационной теории взаимосвязь между характеристиками источника ультразвука и цементной суспензии, влияющие на физико-механические характеристики бетона. Эти соотношения связывают такие характеристики лабораторной установки УЗТА-0,8/22-ОМ как: коэффициент поглощения ультразвука, исходную интенсивность, кавитационный порог (значение интенсивности начала ультразвуковой кавитации), скорость распространения ультразвука в цементной суспензии с характеристиками суспензии: $\frac{B}{C}$, плотностью и вязкостью суспензии.

3. Нарушение оптимальных технологических параметров ультразвуковых излучателей и водоцементных суспензий может привести к отрицательным результатам. Уменьшению предела прочности на сжатие испытываемых бетонных образцов по сравнению с контрольными образцами на 20-25 %.

4. Соблюдение рекомендованных оптимальных технологических параметров, таких как интенсивность ультразвука $I_0 = 7 \div 8 \frac{Bm}{cm^2}$, время кавитации $1 \div 3 \text{ мин}$ и водоцементное отношение суспензии $\frac{B}{C} = 0,5$ позволяет получить прирост прочности контрольных бетоны образцов на 38 %.

5. Уменьшение прочности бетонных образцов до 20 % оказалось при воздействии максимальной интенсивности $I_0 = 10 \frac{Bm}{cm^2}$ на водоцементную суспензию с $\frac{B}{C} = 0,5$. Такая интенсивность, при ограниченном объеме суспензии, ведет к быстрому увеличению ее температуры: время кавитации 120 сек - температура суспензии 70°C . Быстрый нагрев суспензии происходит за счет поглощения части энергии при интенсивном распространении ультразвуковых колебаний. Кроме этого, при сжатии кавитирующего пузырька в нем возникают значительные температуры ($\approx 22^{\circ}\text{C}$), что дополнительно ведет к нагреву суспензии. На наш взгляд, уменьшение прочности образцов происходит за счет двух причин:

- недостаточное время кавитации для процесса разрушения флоккул цемента;
- слипание твердой фазы суспензии (цементных частиц) за счет быстрого подъема температуры, что ведет к нарушению оптимального гранулометрического состава цементной суспензии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилов С.П. Физико-химические аспекты ультразвуковой активации вяжущих материалов. Докторская диссертация. Ленинград. 1975ю

2. Зубрилов С.П., Пилицин С.А. Метод упрочнения бетонов путем ультразвуковой активации цементной пасты. Госстройиздат, Ленинград, 1968.
3. Ахвердов И.Н., Шалимо М.А. Ультразвуковое вибрирование бетона. Госстройиздат, М., 1971.
4. Михайлов И.Г. Ультразвук и его применение. Физиздат, 1958.
5. Розенберг Л.Д. Рассказ о неслышном звуке. Изд. АН СССР, 1961.
6. Терпиловский Н.Н. «Изменение свойств глинистых растворов под действием ультразвука». Труды Казанского технологического института им. Кирова, 1955.
7. Мандельштам Л.И., Леонтович М.А. Замечание об адсорбции ультразвуковых волн в жидкостях и некоторых связанных с ней оптических явлениях. Доклады АН СССР, т.3 (12), № 3 (98) 1936 г.
8. Десов А.В. О структурной вязкости цементного теста, раствора и смеси. Госстройиздат, 1959.
9. Михайлов И.Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. ГТТИ, 1949.
10. Тислинг А.М., Барая А.А. Ультразвук в процессах химической технологии. Госстройиздат, 1969.
11. Винник В.Г. Исследование и разработка гидроакустических методов активации цемента. Автореферат канд. диссертации. М.:, 1969.
12. Плющ Н.А. Исследование интенсификации технологических процессов в строительном производстве с использованием акустических устройств. Минск, 1970.
13. Долгополов И.М. Звухохимические методы в технологии строительных материалов. Госстройиздат, 1938.
14. Капустин А.П. Экспериментальные исследования процессов кристаллизации под воздействием ультразвука. Автореферат дисс. На соискание звания доктора техн. Наук. М. 1952.

УДК 666.971

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ НАПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ (ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ)

Пильгаева Е.М., студентка гр. ТСК-301 Романенко Т.Н., к.т.н., доцент кафедры ТМСП

Национальная академия природоохранного и курортного строительства

Приводится классификация и анализ имеющихся на рынке современных строительных материалов напольных покрытий. Сопоставляются их эксплуатационных, физические, механические свойства и цена. Анализируются области их применения. Определяются возможности применения этих материалов в зданиях и сооружениях различного назначения.

Строительные материалы, напольные покрытия

Виды напольных покрытий

Материалы для покрытий полов принято классифицировать по степени членения элементов покрытия:

- монолитные бесшовные (цементно-бетонные, асфальтобетонные, полимерные мастичные, ксилолитовые, земляные, глинобитные и др.);
- листовые и рулонные материалы (линолеум, синтетические ворсовые покрытия, сверхтвердые древесноволокнистые плиты и др.);
 - штучные материалы (паркет, доски, керамическая плитка, бетонные и каменные плиты, металлические плиты и др.).

Промышленные полы Главным элементом конструкции промышленного пола является бетонное основание, распределяющее нагрузки на грунт.