

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ВАКУУМИРОВАНИЕМ

Розглянуто механізм ущільнення бетонних сумішей вакуумуванням і вібровакуумуванням. Виділено основні фактори, що принципово впливають на цей процес. Дано математичні залежності. Експериментальними дослідженнями підтверджені результати теоретичних розробок.

Рассмотрен механизм уплотнения бетонных смесей вакуумированием и вибровакуумированием. Выделены основные факторы, принципиально влияющие на этот процесс. Даны математические зависимости. Экспериментальными исследованиями подтверждены результаты теоретических разработок.

The mechanism of concrete mix compaction by vacuum compaction and vibro-vacuumizing is considered. The major factors essentially influencing this process are distinguished. The mathematical dependences are given. The theoretical findings are verified by experimental tests.

Постановка проблемы

Удаление излишней воды затворения в процессе вакуумирования (вибровакуумирования) бетонных смесей является сложным гидродинамическим процессом. На практике удаляют эту воду путем создания разности давления при помощи вакуумнасоса между бетонной смесью и ее поверхностью, на которой установлен вакуумщик (или другое вакуумное устройство). За счет вакуумной обработки предоставляется возможность существенно улучшить качество бетона – повысить его плотность, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и др. Результаты дальнейших теоретических исследований по этой проблеме будут способствовать существенному улучшению перечисленных показателей вакуумбетона.

Основной материал

На основании анализа и обобщения литературных данных [1–4] нами установлено, что на процесс вакуумирования бетонных смесей существенное влияние оказывают две принципиальные группы факторов:

– микрофакторы – размер и форма пор в уплотняемой бетонной смеси, толщина двойного электрического слоя на поверхности частиц твердой фазы, явления адсорбции, кальматация пор и т. п.;

– макрофакторы – рабочая поверхность вакуумщика, толщина вакуумируемого изделия (конструкции), разрежение (давление) в вакуумполости вакуумщика, количество и вязкость воды затворения (жидкой фазы).

Микрофакторы, определяющие структуру уплотненного вакуумбетона, решающим обра-

зом влияют на процесс вакуумирования. В дальнейшем последовательно рассмотрены обе группы факторов.

Несмотря на то, что скорость движения воды к вакуумщику в уплотняемой вакуумированием бетонной смеси незначительна, в движущемся ее потоке возникают сильные возмущения, вызванные чрезвычайно сложной конфигурацией пор. Причиной возмущений так же могут служить резкие повороты в поровых каналах, даже на сравнительно малых отрезках их длины, срывы струи с большого количества выступов частиц твердой фазы и образование местных вихрей, возникновение возмущений в потоке воды при слиянии отдельных струек, которые не всегда имеют одно и то же направление движения и величину скорости, резкое изменение сечения порового канала, т.е. внезапное расширение или сужение его, отсутствие разгонного участка, где профиль скоростей мог бы установиться параболическим, что бывает при строго ламинарном режиме движения. В общем случае длину канала постоянного сечения в уплотняемой бетонной смеси нельзя принять больше диаметра зерен мелкого заполнителя или даже зерен цемента.

Немаловажное влияние на характер движения воды в процессе уплотнения бетонной смеси вакуумированием оказывают мельчайшие частицы – глинистые, пылевидные, илестые, которые, как правило, всегда имеются в зерновом составе заполнителей. Кроме этого сами частицы заполнителей бетона в большинстве случаев покрыты тонкой оболочкой («чехлом», «рубашкой»), состоящей из другого вещества. Такие оболочки образуются вследствие электростатического притяжения этих частиц по-

верхностью заполнителя. Вещество оболочек может состоять из различных минеральных и органических соединений, но в большинстве случаев оболочки состоят из глинистых и железистых частиц, а также частичек кремнезема [4].

Во время движения воды часть указанных оболочек может быть разрушена (сорвана) и образовавшиеся таким образом частицы и имеющиеся в бетонной смеси другие частицы размером меньшим, чем диаметр поры (капилляра) под действием удаляемой воды перемещаются, в результате чего может происходить внутреннее засорение пор (каналов) уплотняемой бетонной смеси или полная их закупорка (происходит кальматация).

Таким образом, по высоте уплотняемого слоя бетонной смеси происходит перераспределение мельчайших частиц. Частицы совсем малых размеров уносятся к вакуумщиту и задерживаются фильтром вакуумщита. Некоторые из них проникают и через фильтр. Более крупные частицы распределяются в порах по высоте уплотняемого бетона в зависимости от своих размеров и диаметра пор. Наиболее интенсивный перенос мельчайших частиц происходит в первый момент вакуумирования, когда поры в уплотняемой бетонной смеси имеют относительно большие размеры.

Мелкие частицы под воздействием воды заполняют места между более крупными, еще мельче между предыдущими и т.д. Вода, не задерживаемая фильтром, проникает в вакуумполость вакуумщита, затем – в водосборник. Крупные частицы бетонной смеси под действием вакуума и атмосферного давления сближаются, занимая место удаляемой воды (жидкой фазы). В некоторых случаях, они, попадая в турбулентные потоки последней, которая воздействует на них тангенциальными силами, занимают наиболее устойчивое положение, способствуя, таким образом, получению более плотной структуры бетона.

Существенное влияние на процесс вакуумирования оказывает вовлеченный воздух в бетонную смесь в процессе ее приготовления, а также воздух, растворенный в воде затворения.

Опытами установлено, что растворимость газа в жидкости зависит от давления, под которым он находится над жидкостью. Эта зависимость выражается законом Д. Генри:

$$Q = \alpha \cdot P,$$

где α – коэффициент растворимости газа в жидкости; P – давление над жидкостью.

Известно, что при нормальном давлении в воде находится 3...4 % растворенного воздуха

(от общей массы воды). При понижении давления, согласно закону Д. Генри, воздух из воды затворения будет выделяться в бетонную смесь.

Воздушные пузырьки, которые имеют малые размеры в начале процесса вакуумирования, вместе с извлекаемой водой удаляются из бетонной смеси (при верхнем слое еще не достаточно уплотненном).

В дальнейшем при некотором уплотнении бетонной смеси и падении давления, воздушные пузырьки, увеличиваясь в объеме, уже не могут по капиллярам и порам передвигаться вместе с удаляемой водой, и оказывают сопротивление продвижению последней (равносильно составляющим бетона). Пузырьки в бетоне, увеличиваясь в объеме, являются как бы упругими телами, закупоривающими капилляры и поры. Сближающиеся в процессе вакуумирования составляющие бетона обжимают пузырьки воздуха, при этом увеличение таких пузырьков в объеме замедляется, и при достаточном обжатии приостанавливается. В этом случае может наблюдаться следующее.

При достаточном обжатии пузырька и в результате уноса мельчайшими частицами твердой фазы части воды из его оболочки он разрушится и занимаемый им ранее объем может полностью заполниться частицами цемента и другими мельчайшими частицами – пора ликвидируется; или занимаемый ранее объем пузырьком может частично заполниться твердой фазой и пора на некоторый объем уменьшится, при некоторых условиях образуется шаро- или в большинстве случаев эллипсообразная пора. Как показали наши исследования [5-7], такие поры можно устранить только периодическим вибрированием в процессе вакуумирования.

Касаясь общих закономерностей удаления воды (жидкой фазы) при вакуумировании бетонных смесей (вторая группа факторов) нами отмечено следующее. Объем извлекаемой воды при вакуумировании за малый промежуток времени с единицы вакуумируемой поверхности (площади вакуумщита) прямо пропорционален разрежению в вакуумполости и обратно пропорционален общему сопротивлению уплотняемой бетонной смеси, вязкости воды (жидкой фазы). С учетом обширных результатов исследований по фильтрованию и фильтрации жидкостей в пористых средах [4; 8-10] нами выражено изложенное в общем виде:

$$\frac{dB_{изв}}{dt} = \frac{\Delta P \cdot S}{\mu (R_{б.с.} + R_{в.ш.})}, \quad (1)$$

где $V_{\text{изв}}$ – количество извлеченной воды; S – поверхность вакуумирования; μ – вязкость воды (жидкой фазы); $R_{\text{б.с.}}$ – сопротивление уплотняемой бетонной смеси; $R_{\text{в.щ.}}$ – сопротивление вакуумшита.

Сопротивление уплотняемой бетонной смеси изменяется от нуля вначале вакуумирования до максимального значения в конце процесса.

Так как количество извлеченной воды прямо пропорционально в нашем случае толщине слоя отвакуумированной бетонной смеси, то это можно выразить зависимостью:

$$h_{\text{вак}} = k_0 \frac{V_{\text{изв}}}{S},$$

$h_{\text{вак}}$ – толщина слоя отвакуумированной бетонной смеси; k_0 – коэффициент пропорциональности, который равен:

$$k_0 = \frac{V_{\text{вак}}}{V_{\text{изв}}},$$

$V_{\text{вак}}$ – объем отвакуумированного слоя бетонной смеси.

Сопротивление отвакуумированного слоя бетонной смеси:

$$R_{\text{б.с.}} = r_0 h_{\text{вак}} = k_0 r_0 \frac{V_{\text{изв}}}{S},$$

где r_0 – удельное объемное сопротивление отвакуумированной бетонной смеси (сопротивление оказываемое потоку воды уплотняемой бетонной смесью площадью 1 м^2 и толщиной 1 м).

Подставляя значение $R_{\text{б.с.}}$ в уравнение (1) получим:

$$\frac{dV_{\text{изв}}}{dt} = \frac{\Delta P \cdot S}{\mu \left(k_0 r_0 \frac{V_{\text{изв}}}{S} + R_{\text{в.щ.}} \right)}. \quad (2)$$

При $\Delta P = \text{const}$ все величины в уравнении (2) за исключением $V_{\text{изв}}$ и t имеют постоянные значения. После разделения переменных, интегрирования в пределах от 0 до t и от 0 до $V_{\text{изв}}$ и простейших преобразований получено следующее уравнение вакуумирования бетонной смеси при постоянном разрежении (давлении):

$$V_{\text{изв}}^2 + 2 \frac{R_{\text{в.щ.}} S}{k_0 r_0} V_{\text{изв}} = 2 \frac{\Delta P \cdot S^2}{\mu k_0 r_0} t. \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) значительно упрощается, если принять, что $R_{\text{в.щ.}} = 0$, тогда

$$V_{\text{изв}}^2 = 2 \frac{\Delta P \cdot S^2}{\mu k_0 r_0} t$$

или (4)

$$V_{\text{изв}} = S \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\mu k_0 r_0} t}.$$

Время вакуумной обработки:

$$t = \frac{V_{\text{изв}}^2 \mu k_0 r_0}{2 S^2 \Delta P}. \quad (5)$$

С учетом толщины уплотняемого слоя бетонной смеси (толщины изделия) получено:

$$t = \frac{h_{\text{вак}}^2 \mu r_0}{k_0 \Delta P}. \quad (6)$$

Таким образом, при прочих равных условиях время вакуумной обработки пропорционально квадрату высоты (толщины) изделия.

Полученные теоретические разработки нашли экспериментальное подтверждение.

Для приготовления бетонных смесей применяли следующие материалы:

– шлакопортландцемент М400 (г. Кривой Рог) (ГОСТ 310.1-76);

– зола-унос Приднепровской ГРЭС (ГОСТ 25818-83);

– вода водопроводная (ГОСТ 23732-79).

Состав бетонной смеси приведен в табл. 1. Во всех исследованиях бетонные смеси готовили одинаковой подвижности, характеризующейся осадкой стандартного конуса – ОК = 5...6 см.

Таблица 1

Состав бетонной смеси (кг/м³)

Материалы и плотность бетонной смеси	Единицы измерения	Расход материалов и плотность бетонной смеси
Цемент	кг	350
Зола-унос	кг	927
Вода	л	296
Плотность	кг/м ³	1573

Формовали вакуумированием и вибровакуумированием образцы размером 15x15x7 см (с целью уменьшения влияния масштабного фактора). Предварительное уплотнение бетонной смеси в формах выполняли вибрационным способом в течение 7...10 с. Первую партию образцов подвергали вакуумированию до пре-

кращения удаления избыточной воды затвердения. Величина вакуума составляла 0,7 (полный вакуум принят за единицу). При формировании второй партии образцов во время вакуумирования осуществляли периодическое вибрирование

продолжительностью 8...10 с через каждые 1,5...2 мин (осуществляли два приема вибрирования) [5; 7]. Все образцы твердели в нормальных условиях 28 суток. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Количество извлеченной воды, плотность и прочность бетонов в зависимости от толщины формуемого образца и способа вакуумирования

Толщина образца, мм	Продолжительность вакуумирования, мин	Количество извлеченной воды, л/м ³		Плотность, кг/м ³ при вакуумировании		Предел прочности при сжатии, МПа при вакуумировании	
		без периодического вибрирования	с периодическим вибрированием	без периодического вибрирования	с периодическим вибрированием	без периодического вибрирования	с периодическим вибрированием
70	6	85	96	1620	1652	24,8	28,1
100	13	82	93	1610	1643	24,2	27,4
140	22	80	90	1600	1630	24,1	27,3

Как видно из табл. 2, при увеличении толщины образца в 1,5 раза, продолжительность вакуумирования увеличилась более чем в 2 раза, а при увеличении этой толщины в 2 раза продолжительность вакуумирования выросла в 4 раза, что полностью подтвердило теоретические разработки (уравнение 6).

Приведенные экспериментальные данные полностью подтвердили выводы о необходимости применения периодического вибрирования в процессе вакуумирования с целью разрушения образовавшихся пор. Такой прием предоставил возможность существенно увеличить плотность бетона, при этом предел прочности при сжатии повышается на 13...16 % по сравнению с обычным вакуумированием (см. табл. 2).

Выводы

Рассмотрен механизм уплотнения бетонных смесей вакуумированием и вибровакуумированием. Выделены основные факторы, которые принципиально влияют на этот процесс. Даны зависимости количества извлеченной воды, продолжительности вакуумирования (вибровакуумирования) от величины разрежения (давления) в вакуумпости вакуумшита, толщины формуемого изделия, общего сопротивления уплотняемой бетонной смеси. Теоретические разработки нашли экспериментальное подтверждение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
2. Адамсон А. Физическая химия поверхности. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
3. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 352 с.
4. Жужиков В. А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1980. – 400 с.
5. Сторожук Н. А. Оптимальное управление процессом вибровакуумной обработки бетонной смеси // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1980. - №12. – С. 82 - 86.
6. Сторожук Н. А. Свойства вакуумбетона // Строительные материалы и конструкции. – 1990. - №1. – С. 18 - 19.
7. Сторожук Н. А. Бетоны, уплотненные при оптимальном управлении формированием / Н. А. Сторожук, Т. Н. Дехта // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. тр. – Д.: ПГАСА. – Серия: Стародубовские чтения, 2002. – Вып. 15, ч. 3. – С. 83–86.
8. Толстой Д. М. Скольжение жидкостей и дисперсных систем по твердым поверхностям // Сб. трудов, посвященный памяти акад. Лазарева П. П. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 159–221.
9. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.-Л.: Гостехиздат, 1947. – 244 с.
10. Аравин В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В. И. Аравин, С. Н. Нумеров. – М.: Гостехиздат, 1953. – 616 с.

Поступила в редколлегию 22.09.2007.