

---

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОННОЙ СМЕСИ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

**Ф**ормирование свойств бетона начинается с приготовления, укладки и твердения бетонной смеси. Эти процессы во многом определяют будущее качество бетона и изделия. Поэтому очень важно хорошо знать свойства бетонной смеси, зависимость их от различных факторов, умело управлять этими процессами.

Наиболее важным свойством бетонной смеси является удобоукладываемость, или формуемость, т.е. способность смеси растекаться и принимать заданную форму, сохраняя при этом монолитность и однородность. Удобоукладываемость определяется подвижностью (текучестью) бетонной смеси в момент заполнения формы и пластичностью, т.е. способностью деформироваться без разрыва сплошности.

Для описания поведения бетонной смеси в различных условиях используют ее реологические характеристики: предельное напряжение сдвига, вязкость и период релаксации. Для определения этих свойств применяют специальные вискозиметры. Подобные испытания выполняют главным образом в научно-исследовательских лабораториях. В производственных же усло-

виях контролируют чаще всего подвижность (текучесть) смеси, для чего применяют приборы, позволяющие быстро и сравнительно просто получать необходимую характеристику бетонной смеси.

Для полной оценки бетонной смеси и правильной организации производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций необходимо знать и другие свойства смеси: ее уплотняемость, однородность, расслаиваемость, изменение объема в процессе затвердевания, воздухововлечение, первоначальную прочность (для жестких бетонных смесей при применении немедленной распалубки изделий).

Особенностью бетонной смеси является практически постоянное изменение свойств ее от начала приготовления до затвердевания, что обуславливается сложными физико-химическими процессами, протекающими в бетонной смеси и бетоне. Как уже указывалось, бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную систему. Вследствие наличия сил взаимодействия между дисперсными частицами твердой фазы и воды эта система приобретает связанность и может рассматриваться как единое физическое тело с определенными реологическими, физическими и механическими свойствами.

Основное влияние на эти свойства оказывают количество и качество цементного теста, так как именно цементное тесто, являясь дисперсной системой, имеет высокоразвитую поверхность раздела твердой и жидкой фаз, что способствует развитию сил молекулярного сцепления и повышению связанности системы. Решающее влияние на свойства бетонной смеси оказывает расход воды, так как он определяет объем и строение жидкой фазы, и развитие сил сцепления, характеризующих связанность и подвижность всей системы.

В процессе гидратации цемента (до момента затвердевания) появляется все большее количество гелеобразных гидратных соединений новообразований, что способствует увеличению

дисперсности твердой фазы и соответственно повышению клеящей и пластифицирующей способности цементного теста и его связующей роли в бетонной смеси. Вместе с тем, постепенно уменьшается подвижность смеси.

Цементное тесто относится к так называемым структурированным системам, которые характеризуются некоторой начальной прочностью структуры. В цементном тесте создается структура за счет действия сил молекулярного сцепления между частицами, окаймленными тонкими пленками воды. Пленки жидкой фазы создают непрерывную пространственную сетку в структуре цементного теста, придавая ему свойство пластичности и способствуя формоизменению системы (течению) при приложении внешних силовых воздействий. Начальная прочность структуры или структурная вязкость цементного теста зависят от концентрации твердой фазы в водной суспензии.

Обычно бетонные смеси содержат достаточное количество цементного теста и воды для создания сплошной среды. Такие смеси ведут себя подобно цементному тесту, обладая первоначальной прочностью структуры, определенными пластичностью и подвижностью.

Поведение структурированных систем при приложении внешних сил существенно отличается от поведения жидкостей. Если вязкость жидкости (истинная Ньютоновская) является постоянной и не зависит от значения прикладываемого давления (вязкость жидкости меняется только с изменением температуры), то вязкость структурированных систем изменяется даже при постоянной температуре в несколько раз (часто на 2–3 порядка) в зависимости от значения внешних сил, действующих на систему. Вязкость зависит от значения напряжения сдвига системы или скорости сдвиговых деформаций.

Под действием внешних сил происходит как бы разрыхление первоначальной структуры, ослабевают связи между ее отдель-

ными элементами, а в результате возрастает способность системы к деформациям (течению), увеличивается ее подвижность. При достижении критической скорости сдвига, когда первоначальная структура системы предельно разрушена, вязкость и сопротивление сдвигу достигают минимальных значений и даже малоподвижные смеси приобретают определенную текучесть. После окончания действия внешних сил система возвращается в первоначальное состояние, восстанавливается начальная прочность структуры, уменьшается подвижность.

Способность структурированных систем изменять свои реологические свойства под влиянием механических воздействий и восстанавливать их после прекращения воздействия называется *тиксотропией*. В технологии бетона это свойство широко используют для формования изделий из малоподвижных и жестких смесей путем воздействия на них вибрацией, встряхиванием, ударами.

Представление о поведении бетонной смеси при воздействии на нее внешних сил дает реологическая кривая (рис. 1), которую можно разделить на три участка. На первом участке при небольших значениях напряжений сдвига  $\tau$  сохраняется неразрушенная первоначальная структура бетонной смеси, характеризующаяся наибольшей вязкостью  $\eta_0$ . После достижения критического напряжения  $\tau_1$ , соответствующего пределу текучести системы, начинается разрушение структуры, которое продолжается вплоть до полного разрушения при предельном напряжении  $\tau_0$ . На этом втором участке по мере разрушения системы эффективная вязкость бетонной смеси постоянно падает при увеличении напряжений сдвига. После того как система предельно разрушена, бетонная смесь приобретает наименьшую вязкость (так называемую пластическую вязкость  $\eta_m$  — третий участок кривой), которая не зависит от значений действующих напряжений и не изменяется при их увеличении.

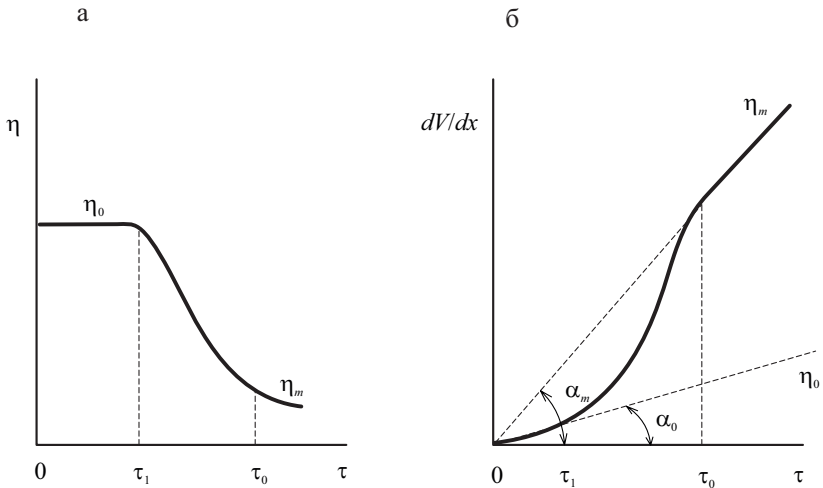


Рис. 1. Изменение вязкопластичных свойств бетонной смеси от напряжений сдвига:

а — структурной вязкости; б — скорости деформации течения ( $\alpha_0$  и  $\alpha_m$  — углы, характеризующие значения коэффициентов вязкости системы)

Для оценки реологических характеристик в производственных условиях применяют упрощенные методы, получая технологические характеристики бетонной смеси, показатель жесткости или подвижности, которые характеризуют поведение смеси в определенных условиях и служат для ориентировочной оценки способности смеси к формуемости и уплотнению при тех или иных условиях воздействия. Однако эти характеристики не дают полных данных о реологических свойствах бетонной смеси.

Используя результаты стандартных испытаний, можно ориентировочно определить реологические свойства бетонной смеси. Так, с помощью стандартного конуса можно определить предельное напряжение сдвига по формуле

$$\tau = \rho_{\text{см}} \cdot V / (2S), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  — средняя плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем конуса, см<sup>3</sup>;  $S$  — площадь основания конуса после его расплыва, см<sup>2</sup>.

Если конус не дает расплыва (то есть бетонная смесь — жесткая), то его следует пригрузить сверху грузом  $P$ .

Тогда

$$\tau = (\rho_{\text{см}} \cdot V + P) / (2S). \quad (2)$$

Ориентировочно можно определить структурную вязкость смеси  $\tau$  на установке, показанной на рис. 2.

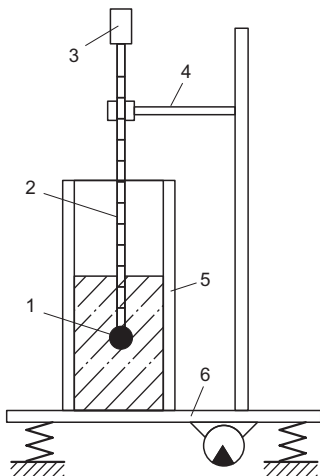


Рис. 2. Схема простейшего шарикового вискозиметра:

1 — стальной шарик; 2 — измерительная штанга; 3 — пригруз;  
4 — штатив; 5 — форма; 6 — вибростол

$$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)t, \quad (3)$$

где  $K$  — константа прибора, устанавливаемая градуированием на смеси или жидкости (например, глицерине) с извест-

ной вязкостью или путем сравнения вязкости, полученной на приборе, с вязкостью, определенной на специальных вискозиметрах (ротационных или др.);  $\rho_1$  — средняя плотность бетонной смеси, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_2$  — средняя плотность шарика, г/см<sup>3</sup>;  $t$  — время погружения или всплытия шарика на определенную глубину, с.

На реологические свойства бетонной смеси оказывают влияние минералогический состав и тонкость помола цемента. В смесях с более тонкомолотыми частицами возрастают силы внутреннего сцепления за счет межмолекулярных и адгезионных сил, уменьшается толщина водных прослоек, вследствие чего возрастает структурная вязкость смеси. В смесях с более грубым помолом твердой фазы более значительное влияние оказывают силы внутреннего трения. В этом случае большая часть воды располагается в пустотах, а не между зернами материала, не играя роль смазки, и структурная вязкость смеси возрастает. Вибрация, способствующая уменьшению внутреннего трения, в этом случае) оказывает большое влияние на изменение свойств смеси, что выражается в увеличении эффекта тиксотропии.

При использовании песка и крупного заполнителя внутреннее трение будет возрастать еще больше.

Большое влияние на реологические свойства бетонной смеси оказывает соотношение между водой и цементом, а также между водой и твердой фазой. Структурную вязкость можно значительно уменьшить за счет введения в бетонную смесь пластифицирующих добавок.

Процедура определения свойств бетонной смеси и бетона приведена ниже.

**1. Приготовление бетонной смеси.** Приготовление смеси производят вручную или механическим путем, при ручном способе перемешивание материалов, входящих в состав бетонной смеси, осуществляют в сферической чаше. В смоченную водой чашу

сначала высыпают песок, затем вяжущее и перемешивают. Далее добавляют крупный заполнитель. Материалы перемешивают в сухом состоянии до получения однородной массы. Сухую смесь собирают в кучу, в которой делают углубление. Примерно половину от общего количества воды выливают в углубление и осторожно перемешивают с материалами, затем выливают оставшуюся воду и смесь снова энергично перемешивают.

При механическом способе перемешивание материалов производится в лабораторных смесителях. Материалы всыпают в смеситель в течение 2 мин. Вода вливается равномерно в течение всего времени засыпки материалов. Время перемешивания для замеса объемом до 30 л — 5 мин, 50 л — 10 мин.

**2. Определение удобоукладываемости бетонной смеси.** Различают литые, подвижные и жесткие бетонные смеси. Подвижность бетонной смеси определяют согласно ГОСТ 10181–2014 с помощью прибора-конуса (нормальный конус — для бетонных смесей с  $D_{\text{наиб}} =$  до 40 мм включительно, увеличенный конус — для смесей с  $D_{\text{наиб}}$  более 40 мм) (рис. 3.). При определении подвижности смесей марок П1–П3 конус, предварительно смоченный изнутри, устанавливают на гладкий металлический лист размером не менее 700×700 мм и заполняют бетонной смесью через воронку тремя равными по высоте слоями. При этом каждый уложенный слой уплотняется в нормальном конусе 25-кратным, а в увеличенном — 56-кратным штыкованием металлическим стержнем диаметром 16 мм, длиной 600 мм с закругленными концами. Во время наполнения и штыкования конус должен быть плотно прижат к листу. Бетонной смесью марок П4 и П5 конус заполняют в один прием и штыкуют в нормальном конусе 10 раз, в увеличенном — 20 раз.

После уплотнения бетонной смеси в конусе воронку снимают и избыток смеси срезают вровень с верхними краями конуса. Затем конус плавно, в течение 5–7 с, снимают с отформо-



ванной бетонной смеси и устанавливают рядом с ней. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая металлическую линейку ребром на верх конуса и измеряя расстояние от нижней грани линейки до верха бетонной смеси с точностью до 0,5 см.

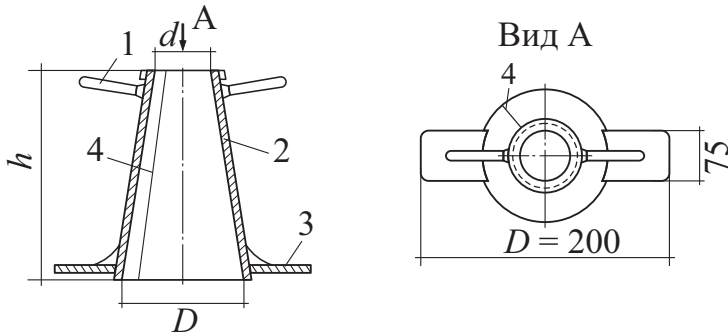


Рис. 3. Прибор-конус для определения подвижности бетонной смеси:

1 — ручка; 2 — конус; 3 — упоры; 4 — сварной шов

Подвижность бетонной смеси оценивается величиной осадки конуса (в см) как среднее арифметическое результатов двух определений, отличающихся между собой не более чем:

- на 1 см при осадке конуса до 9 см включительно;
- 2 см при осадке конуса от 10 до 15 см;
- 3 см при осадке конуса от 16 см и выше.

Если осадка конуса равна нулю, то удобоукладываемость бетонной смеси характеризуется жесткостью. Жесткость бетонной смеси оценивается временем вибрирования (в с), необходимым для выравнивания и уплотнения предварительно отформованного конуса бетонной смеси в приборе для определения жесткости (прибор Вебе) (рис. 4).

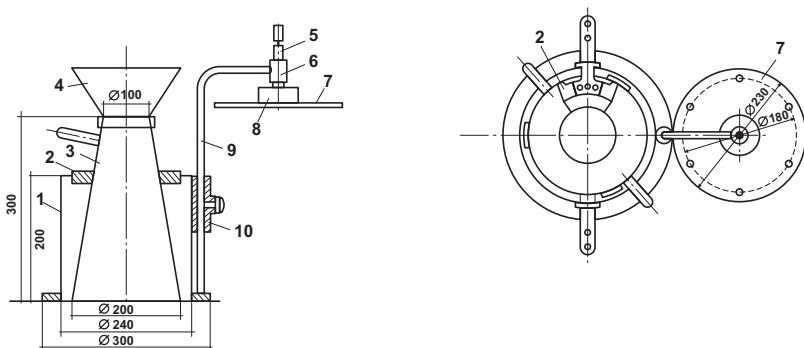


Рис. 4. Прибор для определения жесткости бетонной смеси:

- 1 — кольцо с фальцем в основании; 2 — кольцо-держатель с ручками;  
 3 — конус; 4 — загрузочная воронка; 5 — штанга; 6 — направляющая втулка;  
 7 — диск в шесть отверстий; 8 — шайба; 9 — штатив;  
 10 — фиксирующая втулка с зажимным винтом

Для определения жесткости бетонной смеси прибор собирают и помещают его на виброплощадку. Устанавливают и жестко закрепляют цилиндрическое кольцо прибора 7, в которое вставляют конус 3 и закрепляют его ручками 2, заводя их в пазы кольца, после чего устанавливают воронку 4. Заполнение конуса прибора бетонной смесью, уплотнение ее и снятие конуса с отформованной смеси производят так же, как описано выше. На поверхность отформованного конуса из бетонной смеси поворотом штатива 9 устанавливают диск 7. Штатив закрепляют в фиксирующей втулке 10 зажимным винтом. Затем одновременно включают виброплощадку и секундомер и вибрируют до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из любых двух отверстий диска. Одновременно выключают секундомер и виброплощадку. Полученное время характеризует жесткость бетонной смеси. Ее вычисляют с точностью до 1 с как среднее арифметическое результатов двух определений, отличающихся между собой не более чем на 20 % среднего значения.

Для определения жесткости бетонной смеси также можно использовать метод Красного и метод Скрамтаева, показатели жесткости на которых умножаются на переводной коэффициент. Допускается принимать переходный коэффициент для метода Красного равным 1, для метода Скрамтаева — 0,7.

У литых высокоподвижных бетонных смесей определяют расплыв на встряхивающем столе (рис. 5) с использованием формы–конуса следующих размеров, мм: нижний диаметр —  $(200 \pm 2)$ , верхний диаметр —  $(130 \pm 2)$ , высота —  $(200 \pm 2)$ .

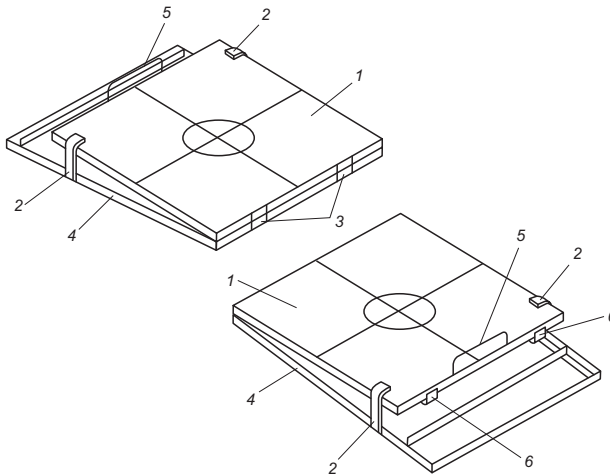


Рис. 5. Встряхивающий стол:

- 1 — верхняя плита; 2 — верхний блок-останов; 3 — наружные шарниры;  
 4 — нижняя плита-основание; 5 — ручка для подъема;  
 6 — нижний блок-останов

Стол и конусную форму очищают и увлажняют до испытания. Затем форму, зафиксированную в центре стола, наполняют бетонной смесью двумя равными слоями. Каждый слой уплотняют 10 легкими ударами уплотняющего бруса. После напол-

нения конуса уплотняющим брусом срезают излишек массы вровень с краями формы. Через 30 с с момента срезки излишка смеси форму поднимают за ручки вертикально вверх за время от 3 до 6 с. Верхнюю плиту стола плавно поднимают до верхнего блока-останова так, чтобы плита не стукнулась о блок-останов. Дают возможность верхней плите стола свободно упасть на нижний блок-останов. Цикл повторяют 15 раз. После этого линейкой измеряют максимальные размеры расплыва бетонной смеси с точностью до 10 мм в двух направлениях, параллельных краям стола. По этим значениям рассчитывают средний диаметр расплыва.

Расплав бетонной смеси вычисляют с округлением до 10 мм как среднеарифметическое значение результатов двух определений расплыва одной пробы бетонной смеси, отличающихся между собой не более чем на 20 % среднего значения.

По показателям удобоукладываемости бетонные смеси делят на несколько категорий и марок (ГОСТ 7473–2010, табл. 1).

*Таблица 1*

Марки бетонной смеси

Марка по расплыву конуса	Расплав конуса, см	Марка по осадке конуса	Осадка конуса, см	Марка по жесткости	Жесткость, с
P1	Менее 35	П1	1–4	Ж1	5–10
P2	35–41	П2	5–9	Ж2	11–20
P3	42–48	П3	10–15	Ж3	21–30
P4	49–55	П4	16–20	Ж4	31–50
P5	56–62	П5	Более 20	Ж5	Более 50
P6	Более 62	–	–	–	–

**3. Корректирование удобоукладываемости бетонной смеси.**

Если подвижная бетонная смесь имеет осадку конуса меньше

заданной, то в нее добавляют воду порциями, составляющими 2–3% от заданного количества. Изменение осадки конуса на 1 см требует 2–4 л воды на 1 м<sup>3</sup> бетона. Чтобы сохранить принятое водоцементное отношение, добавляют соответствующее количество цемента и производят повторное определение подвижности бетонной смеси. Если бетонная смесь имеет избыточную подвижность по сравнению с требуемой, в замес добавляют песок и крупный заполнитель, сохраняя заданное по расчету соотношение между ними. Заполнители добавляют порциями по 3–5% от их массы и производят повторное определение подвижности.

Корректирование удобоукладываемости жесткой бетонной смеси производится так же, как и подвижной смеси. Только для каждого нового определения (во избежание искажения результатов от повторного вибрирования) берется вновь приготовленная порция бетонной смеси.

**4. Изготовление образцов.** Изготовление образцов-кубов осуществляют в соответствии с ГОСТ 10180–2012. Размер образца-куба зависит от максимального размера зерен крупного заполнителя в бетоне. Для испытаний бетона с наибольшим размером зерен заполнителя 20 и 40 мм наименьшие ребра куба должны составлять 100 и 150 мм. Перед изготовлением образцов внутренние поверхности форм покрывают тонким слоем смазки. Смазка для форм не должна вступать в химическое взаимодействие с бетонной смесью и бетоном и оставлять следы на его поверхности.

Укладку и уплотнение бетонной смеси в формах производят в зависимости от марки по удобоукладываемости следующим образом.

Уплотнение бетонной смеси марок по удобоукладываемости П4 и П5 проводят вручную с применением штыковки. Формы заполняют бетонной смесью слоями высотой не более 100 мм. Каждый слой уплотняют штыкованием стальным стержнем ди-

аметром 16 мм с закругленным концом. Число нажимов стержня рассчитывают из условия, чтобы один нажим приходился на 10 см верхней открытой поверхности образца. Штыкование проводят равномерно по спирали от краев формы к ее середине. Уплотнение бетонной смеси механическими методами проводят с использованием виброплощадки или глубинного вибратора.

При уплотнении бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1, П2, П3, Ж1 с использованием виброплощадки форму с уложенной и уплотненной штыкованием бетонной смесью жестко закрепляют на лабораторной виброплощадке и вибрируют до полного уплотнения, характеризуемого прекращением оседания бетонной смеси, выравниванием ее поверхности, появлением на ней тонкого слоя цементного теста.

При уплотнении бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж2, Ж3, Ж4, Ж5 с использованием виброплощадки на форме закрепляют насадку, устанавливают на поверхность бетонной смеси пригруз, обеспечивающий давление  $(0,004 \pm 0,0005)$  МПа, и вибрируют до прекращения оседания пригруза и дополнительно 5–10 с.

При уплотнении с использованием глубинного вибратора диаметр вибратора не должен превышать  $1/4$  наименьшего размера формуемого образца. Вибратор должен находиться в вертикальном положении и не касаться дна или стенок формы. После окончания укладки и уплотнения бетонной смеси в форме верхнюю поверхность образца заглаживают мастерком или пластиной.

Изготовленные образцы должны твердеть в формах, покрытых влажной тканью при температуре  $(20 \pm 2)$  °С в течение 1 сут. Затем распалубленные образцы твердеют в камере при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха не ниже 90%. Перед испытанием образцы выдерживают 2–4 ч в помещении при температуре  $(20 \pm 1)$  °С. Распалубливание образцов естественного твердения, предназначенных для определения  $R_p$  и  $R_{изг}$ , необходимо производить через 4 сут, а для определения  $R_{сж}$  для

бетонов класса В5 (или с добавками-замедлителями твердения) — через 2–3 сут.

Образцы могут подвергаться также до распалубливания тепловой обработке (пропариванию, автоклавированию и т. п.).

Изготовленные образцы могут иметь на 100 мм длины неплоскостность опорных поверхностей кубов или призм — не более 0,05 мм; непрямолинейность образующей цилиндров — не более 0,1 мм и неперпендикулярность смежных граней — не более 1 мм.

**5. Определение средней плотности (объемной массы) бетонной смеси, средней плотности бетона и его влажности.** Для определения фактического расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси необходимо знать значение средней плотности бетонной смеси. Средняя плотность бетона и влажность для некоторых видов бетона (ячеистых, на пористых заполнителях) являются нормируемыми величинами.

Средняя плотность бетонной смеси, характеризуемая отношением массы уплотненной бетонной смеси к ее объему, определяется в цилиндрическом сосуде вместимостью 5 дм<sup>3</sup> при использовании заполнителей наибольшей крупностью 40 мм или в формах. Укладку и уплотнение бетонной смеси в сосуде или в форме производят, как описано выше, в зависимости от удобоукладываемости смеси. Сосуд или форму взвешивают до испытаний ( $m_1$ , г) и с бетонной смесью после уплотнения ( $m$ , г).

Среднюю плотность бетонной смеси  $\rho_{\text{см}}$  (кг/м<sup>3</sup>) определяют как среднее арифметическое значение результатов двух определений плотности смеси из одной пробы и вычисляют с округлением до 10 кг/м<sup>3</sup> по формуле

$$\rho_{\text{см}} = [(m - m_1)/V] \cdot 1000, \quad (4)$$

где  $V$  — вместимость мерного сосуда (формы), см<sup>3</sup>.

Среднюю плотность бетона можно определять на образцах:

- в состоянии  $\rho_v^e$  естественной влажности (в этом случае образцы испытывают немедленно после их приготовления);

- в воздушно-сухом состоянии  $\rho_v^{bc}$  (в этом случае образцы выдерживают в эксикаторах или закрытом помещении с  $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и  $W_B = (50 \pm 10)\%$  не менее 7 сут);
- в сухом состоянии  $\rho_v^c$  (образцы высушивают при  $t = (105 \pm 5)^\circ\text{C}$  до постоянной массы);
- в нормальном состоянии  $\rho_v^H$  (образцы выдерживают 28 сут при  $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и ( $W_B \leq 95\%$ ));
- в водонасыщенном состоянии  $\rho_v^B$  (образцы насыщают в воде по специальной методике).

Плотность бетона можно определять в нормированном состоянии  $\rho_v^{np}$ . При этом если образцы имеют влажность, отличающуюся от нормируемой, тогда

$$\rho_v^{np} = \rho_v^w (1 + W^{np})/W, \quad (5)$$

где  $W^{np}$  — нормированная влажность бетона по массе, %;  $W$  — влажность бетона в момент испытания, %;  $\rho_v^w$  — средняя плотность бетона при влажности  $W$ .

Для определения средней плотности бетона, влажности, плотности, водопоглощения, а также других характеристик руководствуются ГОСТ 12730.1–78 и 12730.5–84. При этом изготавливают образцы правильной формы. Наименьший объем образца  $V$  (дм<sup>3</sup>) зависит от наибольшей крупности заполнителя (см. ниже).

Среднюю плотность бетона (кг/м<sup>3</sup>) определяют с погрешностью до 1 кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_6 = 1000 m/V, \quad (6)$$

где  $m$  — масса образца, г;  $V$  — объем образца, см<sup>3</sup>.

Зависимость объема образцов бетона от крупности зерен заполнителя

Объем, дм <sup>3</sup>	1	3	8	27
$D_n$ , мм	≤20	40	70	≥100



Массу измеряют с погрешностью не более 0,1 %, а объем — не более 1 % при температуре в помещении  $t = (25 \pm 10) ^\circ\text{C}$ . Для образцов правильной формы объем образца вычисляют по данным измерений геометрических размеров с погрешностью до  $\pm 1$  %.

**6. Определение фактического расхода составляющих материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона.** Сначала определяют среднюю плотность бетонной смеси при принятом режиме уплотнения или по методике, изложенной выше, или упрощенным способом. Для этого взвешивают пустую форму, замеряют ее внутренние размеры, заполняют смесь, уплотняют и вновь взвешивают.

Плотность бетонной смеси ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) рассчитывают по формуле

$$\rho_{\text{см}} = (m - m_1)/V, \quad (7)$$

где  $m_1$  и  $m$  — соответственно массы пустой и заполненной смеси формы, кг;  $V$  — вместимость формы,  $\text{дм}^3$ .

Затем по сумме масс материалов  $\Sigma M$ , израсходованных на пробный замес, и плотности бетонной смеси определяют фактический объем замеса или выход бетонной смеси:

$$V_3 = \Sigma M / \rho_{\text{см}}. \quad (8)$$

Фактический расход материалов на 1 м<sup>3</sup> уплотненной бетонной смеси будет

$$M_{\text{ф}} = (M_3 / V_3) 1000, \quad (9)$$

где  $M_{\text{ф}}$  — фактический расход материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $M_3$  — расход материала на замес, кг;  $V_3$  — фактический объем замеса,  $\text{дм}^3$ .

**7. Испытание образцов.** При испытании бетона на сжатие определяют следующие две характеристики: заданную прочность на сжатие на образцах-кубах с размером ребра 70, 100, 150, 200, 300 мм или образцах-цилиндрах диаметром 70, 100, 150, 200, 300 мм и высотой  $H = 2D$  и призмную прочность на образцах-призмах с размерами  $100 \times 100 \times 400$  и  $150 \times 150 \times 600$  мм.

Испытание образцов на осевое сжатие осуществляют на прессах, которые выбирают с учетом следующих требований: ожидаемая разрушающая нагрузка должна составлять 0,2–0,8 от максимального усилия  $P_{\max}$ , соответствующего выбранному диапазону измерения; не допускается использовать участки шкалы менее  $0,2 P_{\max}$  и испытание силой меньше 10% от  $P_{\max}$ .

Перед испытанием образцы осматривают, измеряют их размеры с погрешностью  $\pm 1\%$  и взвешивают. В случае необходимости для тяжелого бетона класса В7,5 допускается шлифование граней или их выравнивание слоем толщиной до 2 мм из быстротвердеющих составов с прочностью не менее половины ожидаемой прочности образца. При испытании образец укладывают на нижнюю опорную плиту пресса боковыми поверхностями. Напряжение в образце при нагружении должно возрастать непрерывно с постоянной скоростью  $0,6 \pm 0,2$  МПа/с до его разрушения.

Прочность бетона на сжатие вычисляют для каждого образца с точностью до 0,1 МПа по формуле

$$R_{\sigma} = \alpha (P/S) K_w, \quad (10)$$

где  $\alpha$  — масштабный коэффициент прочности бетона в образцах базового размера (табл. 2);  $P$  — разрушающая нагрузка, Н;  $S$  — средняя площадь рабочего сечения образца, см<sup>2</sup>;  $K_w$  — коэффициент, учитывающий влажность ячеистого бетона, для других видов бетонов  $K_w = 1$ .

Прочность бетона (кроме ячеистого) в серии образцов определяют как среднеарифметическое значение прочности испытанных образцов в серии:

- из двух образцов — по двум образцам;
- из трех образцов — по двум образцам с наибольшей прочностью;
- из четырех образцов — по трем образцам с наибольшей прочностью;

- из шести образцов — по четырем образцам с наибольшей прочностью.

Таблица 2

Значения коэффициента  $\alpha$ 

Форма образца	Размер образца, мм: ребра $H \times D$	$\alpha$
Куб	70,07	0,85
	100	0,91
	150	1,0
	200	1,05
	300	1,1
Цилиндр	70×140	1,16
	100×200	1,16
	150×300	1,2
	200×400	1,24

Призменную прочность определяют по ГОСТ 10180–2012 и методике НИИЖБа. Перед началом испытаний призму центрируют на опорной плите пресса, устанавливают индикаторы и проводят измерения деформаций. Величина деформации по каждой из граней не должна отклоняться от среднего значения более чем на 10 %.

После завершения центрирования образца по физической оси приборы, установленные для измерения деформаций, снимают и начинают загрузку образца. Нагрузку увеличивают до конца разрушения ступенями по  $0,1 P_p$  с интервалами до 5 мин. Продолжительность испытания — не менее 20 мин.

Допускается загружать призмы непрерывно с равномерно возрастающей нагрузкой и постоянной скоростью роста напряжений  $0,6 \pm 0,4$  МПа, а общая продолжительность испытания — такая же, как и при ступенчатом нагружении.

**8. Расчет прочности бетона во времени.** Пользуясь логарифмическим законом роста прочности бетона во времени, твердеюще-

го в нормальных условиях, зная его первоначальную прочность (но не ранее чем через 3 сут), можно определить прочность бетона в возрасте 28 сут или в другие сроки его твердения по формуле

$$R_t/R_{28} = \lg t/\lg 28, \quad (11)$$

где  $R_t$  — прочность в возрасте  $t$  сут;  $\lg t$  — логарифм времени испытания (но не ранее 3 сут);  $R_{28}$  — прочность в возрасте 28 сут;  $\lg 28$  — логарифм 28.

Формулу (11) можно преобразовать:

$$R_{28} = R_t \cdot \lg 28/\lg t. \quad (12)$$

Получаемая прочность является весьма приближенной, так как формулой не учитываются ни действительные условия твердения, ни свойства цемента, ни другие факторы.

## Практическое занятие к теме 1

*Цель* — определить реологические характеристики бетонной смеси, исследовать влияние на них некоторых факторов, связанных с качеством материалов и составом смеси, оценить их влияние на прочность бетона.

Работа проводится группой из 2–3 бригад. Бригады в соответствии с заданием преподавателя определяют реологические характеристики бетонной смеси и устанавливают влияние на них некоторых факторов: вида и качества крупного и мелкого заполнителей, величины водоцементного отношения, вида и количества пластифицирующей добавки, формируют образцы бетонов и оценивают влияние реологии смеси на их прочность.

Каждая бригада рассчитывает расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона и для приготовления замеса объемом 6,5 л или использует данные преподавателя. Изготавливаются замесы и определяются:

- подвижность или жесткость;
- фактическая средняя плотность (объемная масса) бетонной смеси;
- фактический расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси;
- средняя плотность бетона;
- прочность бетона.

Экспериментальные данные анализируются. Полученные результаты оформляются в форме отчета, который содержит титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты. Приводится цель работы и исходные данные.

Приводится расчет состава бетонной смеси с пояснениями и ссылками на таблицы и формулы, краткое описание методики приготовления бетонной смеси, определения и корректировки удобоукладываемости. Результаты расчета заносятся в следующую табличную форму:

Характеристика бетонных смесей

Номер замеса	$M_{кр}$ П	$D_{наиб}$ КЗ	В/Ц	Вид и кол-во Д, %	$\rho_{б.см}$ , кг/м <sup>3</sup>	Подвижность, см/Жесткость, с	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
							Ц	П	КЗ	В	Д
1											
2											

Проводится расчет величины предельного напряжения сдвига (для этого при определении удобоукладываемости бетонной смеси определяют объем конуса и площадь его основания после расплыва). Результаты заносятся в табличную форму:

### Предельное напряжение сдвига бетонной смеси

Номер замеса	Размеры конуса из бетонной смеси		Масса бетонной смеси в конусе, кг	Масса пригруза, кг	Предельное напряжение сдвига, Па
	Диаметр, см	Площадь, см <sup>2</sup>			
1					
2					
...					

Краткое описание методики формования образцов и определения прочности. Результаты заносятся в форму.

### Механическая прочность и средняя плотность бетона

№ п/п	Наименование показателей	Номер образца			
		1	2	3	Среднее значение
1	Масса, кг				
2	Размеры, см: длина, ширина, высота				
3	Объем, см <sup>3</sup>				
4	Влажность, мас. %				
5	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>				
6	Разрушающая нагрузка, Н (кгс)				
7	Площадь образца, см <sup>2</sup>				
8	Предел прочности при сжатии в возрасте _____ сут.				

Приведение полученной прочности к стандартным параметрам (по размерам образцов, влажности, возрасту твердения).

По результатам испытаний строятся графические зависимости изменения удобоукладываемости и предельного напряжения сдвига от варьируемых показателей по примеру рис. 6, 7.

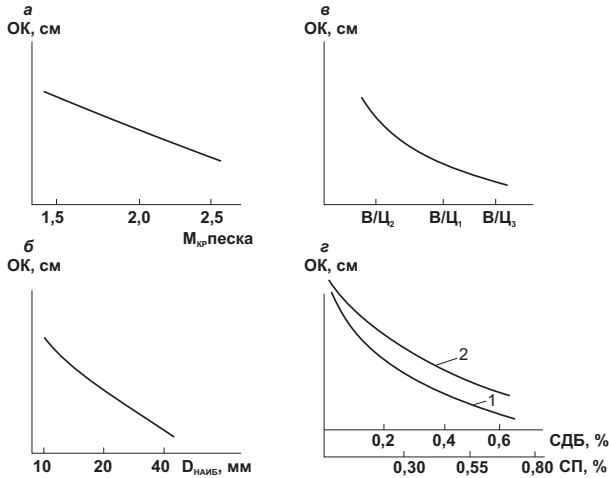


Рис. 6. Изменение удобоукладываемости бетонной смеси в зависимости: а — от качества мелкого заполнителя; б — от качества крупного заполнителя; в — от величины В/Ц; г — от вида и количества пластификатора

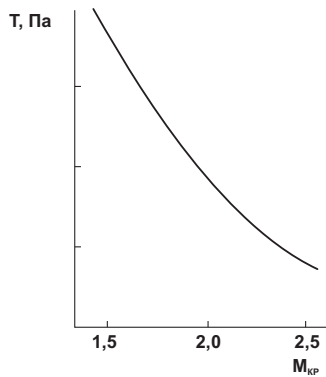


Рис. 7. Изменение предельного напряжения сдвига бетонной смеси в зависимости от крупности песка

В конце отчета приводится заключение по соответствию полученных результатов поставленным задачам.

---

## 2. УСКОРЕННЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТА В БЕТОНЕ И НАЗНАЧЕНИЯ СОСТАВА БЕТОНА

Для правильного определения состава бетона важно знать, как зависит его прочность от качества цемента и заполнителей, соотношения между составляющими и прочих факторов. Прочность бетона в определенный срок при твердении зависит главным образом от прочности (активности) цемента и водоцементного отношения.

Под водоцементным отношением понимают отношение массы воды к массе цемента в свежеизготовленной бетонной смеси, причем учитывают только свободную, не поглощенную заполнителем воду.

Прочность бетона повышается с увеличением прочности цемента или уменьшением водоцементного отношения. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$R_6 = \frac{R_{\text{ц}}}{A(B/\text{Ц})^{0,5}}, \quad (13)$$

где  $R_6$  — прочность бетона после 28 сут нормального твердения;  $R_{\text{ц}}$  — активность цемента;  $A$  — коэффициент, учитывающий влияние других факторов;  $B/\text{Ц}$  — водоцементное отношение.

Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения вытекает из физической сущности формирования структу-



ры бетона и графически изображается в виде гиперболических кривых (рис. 8).

Как известно, цемент при твердении в зависимости от качества и срока твердения присоединяет всего 15–25 % воды от массы цемента. Вместе с тем, для придания бетонной смеси пластичности добавляют воды значительно больше (40–70 % от массы цемента, В/Ц = 0,4–0,7), так как при В/Ц = 0,2 бетонная смесь является почти сухой и ее нельзя качественно перемешать и уложить. Избыточная вода, не вступающая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. В обоих случаях бетон будет ослаблен наличием пор, и чем больше их, т. е. чем больше В/Ц, тем ниже прочность бетона. Таким образом, закон водоцементного отношения, по существу, выражает зависимость прочности бетона от его плотности или пористости.

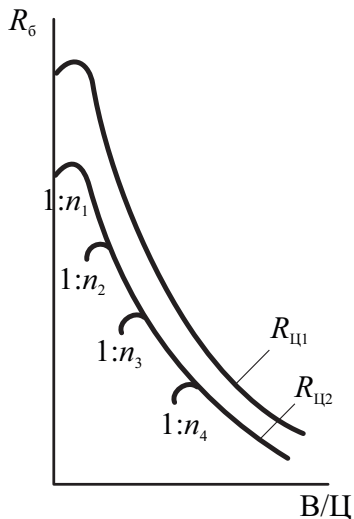


Рис. 8. Зависимость прочности бетона от В/Ц и  $R_{ц}$ :

$1:n_i$  — отношение массы цемента к массе заполнителя;  $R_{ц1} > R_{ц2}$

Зависимость прочности бетона от его водоцементного отношения выполняется лишь в определенных пределах. При очень низких водоцементных отношениях, даже при повышенных расходах цемента и воды, не удастся получить удобоукладываемые бетонные смеси и необходимую плотность бетона, поэтому зависимость  $R_6 = f(V/C)$  нарушается и с дальнейшим уменьшением  $V/C$  прочность бетона не увеличивается, а затем даже начинает уменьшаться (левая ветвь кривых на рис. 8). Определенную роль в снижении прочности бетона в этом случае играет и тот факт, что для гидратации цемента необходим некоторый избыток воды (в 2–3 раза) по сравнению с тем количеством, которое непосредственно вступает во взаимодействие с цементом. Резкое уменьшение этого избытка влечет за собой замедление гидратации и, следовательно, понижение прочности бетона.

Зависимость прочности от водоцементного отношения строго соблюдается лишь при испытании бетона на одинаковых материалах с близкой подвижностью бетонной смеси и при применении одинаковых приемов приготовления и укладки бетона. На прочность бетона, хотя и менее существенное, чем  $R_{ц}$  и  $V/C$ , но заметное влияние оказывают вид цемента, свойства заполнителей, способы приготовления образцов и другие факторы.

Таким образом, в действительности имеется не одна строгая кривая, выражающая зависимость  $R_6 = f(V/C)$ , а некоторая полоса (рис. 9), на которой укладывается большинство опытных результатов с учетом возможных колебаний прочности бетона, вызванных влиянием других факторов. Однако для облегчения расчетов часто используют средние кривые для зависимости  $R_6$  от  $V/C$  или выражающие их формулы. В формулах прочности бетона влияние качества цемента, заполнителей и других факторов обычно учитывают применением эмпирических коэффициентов.

На практике могут наблюдаться заметные отклонения прочности бетона от значений, определенных по той или иной кривой или формуле. В отдельных случаях действительная проч-

ность может отличаться от расчетной в 1,3–1,5 раза. Поэтому при проектировании состава бетона полученный расчетом состав принято проверять в контрольных замесах.

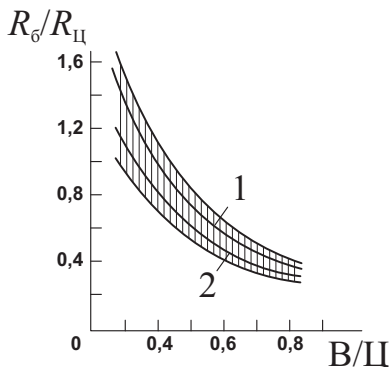


Рис. 9. Зависимость средней прочности бетона от В/Ц, используемая при проектировании состава бетона и возможные отклонения прочности бетона от средних значений:

1 — бетон на щебне; 2 — бетон на гравии

С развитием технологии бетона, факторов, влияющих на прочность бетона, становится все больше, так как расширяется ассортимент цемента, заполнителей, возникают новые технологические приемы приготовления, укладки и выдерживания бетонной смеси, поэтому особое значение приобретают предварительные испытания бетона на материалах, предназначенных к применению в соответствии с намечающейся технологией. Испытания обязательны также при большом объеме работ, так как они дают возможность получить более надежную зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и других факторов, которой и следует пользоваться в дальнейшем. Если предварительные испытания не проводились, то эту зависимость можно уточнить в процессе производства при контрольных испытаниях бетона.

В практике строительства материалы и технология, применяемые на данном объекте или заводе, как правило, не меняются в процессе производства и главным фактором, позволяющим получать бетоны разной прочности, является водоцементное отношение. Это еще раз подчеркивает важное значение закона водоцементного отношения для технологии бетона.

Для определения состава бетона более удобна не зависимость его прочности от водоцементного отношения, а обратная зависимость прочности от цементно-водного отношения. При изменениях цементно-водных отношений от 1,3 до 2,5 эта зависимость является прямолинейной и может быть выражена формулой

$$R_6 = A \cdot R_{II} (Ц/В - C), \quad (14)$$

где  $R_6$  — прочность бетона в возрасте 28 сут;  $A$  и  $C$  — эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние заполнителей и других факторов на прочность бетона (в среднем  $A = 0,6$ ;  $C = 0,5$ );  $Ц/В$  — цементно-водное отношение.

Зависимости (13) и (14) справедливы только для плотно уложенного бетона, получающегося при применении подвижной бетонной смеси. Жесткие бетонные смеси требуют для тщательного уплотнения особых приемов (длительного вибрирования, сильного трамбования, прокатки или прессования). Если при уплотнении бетона в нем сохраняются воздушные поры, то в этом случае объем воздушных пор прибавляют к объему пор, оставшихся от воды, подставляя в формулы вместо  $В$  значения  $(В+ВВ)$ , где  $ВВ$  — объем воздушных пор.

Действительная прочность бетона может быть определена только испытанием контрольных образцов, твердеющих в условиях, аналогичных условиям твердения бетонных сооружений, или испытанием бетона в самом сооружении.

В расчетах состава бетона обычно используют средние зависимости прочности бетона от различных факторов, выведенные на основании многочисленных опытов. Результаты испытаний, по-

лучаемые в отдельных лабораториях, могут отличаться от средних значений, так как на них сказываются качество материалов, особенности используемого оборудования, квалификация исполнителей.

О возможных колебаниях прочности бетона при изменении водоцементного отношения и других факторов можно судить по материалам работы, выполненной рядом лабораторий при введении нового ГОСТа на испытание цемента. В результате были получены средние зависимости, используемые в технологических расчетах.

При проведении работы было использовано 197 партий цемента с 40 цементных заводов, 39 разновидностей крупного заполнителя, в том числе щебень из изверженных и осадочных (карбонатных) пород, гравий, щебень, полученный дроблением гравия, и 17 разновидностей песка, преимущественно средней крупности и в отдельных случаях мелкого.

Опыты подтвердили, что при значении  $V/C = 0,4-0,7$  существует прямолинейная зависимость между прочностью бетона, активностью цемента и цементно-водным отношением. При одинаковом водоцементном отношении прочность бетона мало зависит от подвижности бетонной смеси: предел прочности образцов, приготовленных из жесткой бетонной смеси, был выше прочности образцов из пластичной смеси в среднем всего на 1–5 %. Путем обобщений опытных данных выведена единая формула с усредненными коэффициентами:

$$R_6 = 0,56R_{ц} (C/V - 0,5). \quad (15)$$

Среднее отклонение значений  $R_6/R_{ц}$ , определенных по формулам, полученным в отдельных лабораториях, от значений, определенных по формуле (15), составляет 12–13 %. Максимальное отклонение не более 25 %.

Опыты показали, что замена щебня гравием вызывает снижение  $R_6/R_{ц}$  до 25 %. Уменьшение  $R_6/R_{ц}$  отмечалось также при применении мелкого песка, местных слабых заполнителей или цементов низких марок.

При  $Ц/В$  свыше 2,5 прямолинейная зависимость между прочностью бетона и  $Ц/В$  нарушается. Действительные значения прочности получаются ниже расчетных. Так, при  $Ц/В = 3,33$  ( $В/Ц = 0,3$ ) среднее снижение прочности составило 12%.

Для практических целей удобно зависимость  $R_б = f(Ц/В)$  при  $Ц/В > 2,5$  принимать прямолинейной, но с меньшим углом наклона прямой, чем при  $Ц/В < 2,5$ . Ошибка расчетов в этом случае не превысит 2–4%. При обобщении результатов опытов для этого участка получена средняя формула прочности.

$$R_б = 0,36R_ц (Ц/В + 0,53). \quad (16)$$

Таким образом, зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения и активности цемента не может быть выражена одной формулой. Строго говоря, эта зависимость вовсе не прямолинейная, а представляет собой довольно сложную кривую (рис. 10).

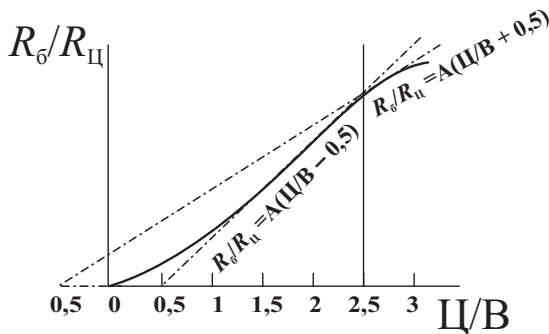


Рис. 10. Зависимость прочности бетона от  $Ц/В$

Однако для практических целей эту кривую можно заменить двумя прямыми и для расчета состава бетона использовать две эмпирические формулы

- для бетонов с  $В/Ц \geq 0,4$  ( $Ц/В < 2,5$ ):

$$R_0 = AR_{\text{ц}} (\text{Ц/В} - 0,5); \quad (17)$$

- для бетонов с  $\text{В/Ц} \leq 0,4$  ( $\text{Ц/В} > 2,5$ ):

$$R_0 = A_1 R_{\text{ц}} (\text{Ц/В} + 0,5). \quad (18)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  принимаются по табл. 3.

При  $\text{В/Ц} = 0,4$  получается

$$AR_{\text{ц}} (\text{Ц/В} - 0,5) = AR_{\text{ц}} (\text{Ц/В} + 0,5).$$

Приведенные формулы справедливы для бетонов из умеренно жестких и подвижных бетонных смесей, уложенных вибрацией при коэффициенте уплотнения не ниже 0,98.

Таблица 3

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$  в формулах (17) и (18)

Материалы для бетона	$A$	$A_1$
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества	0,55	0,37

*Примечание.* Высококачественные материалы: щебень из плотных горных пород высокой прочности, песок оптимальной крупности и портландцемент высокой активности, без добавок или с минимальным количеством гидравлической добавки; заполнители чистые, промытые, фракционированные с оптимальным зерновым составом смеси фракций. Рядовые материалы: заполнители среднего качества, в том числе гравий, портландцемент средней активности или высокомарочный шлакопортландцемент. Материалы пониженного качества: крупные заполнители низкой прочности и мелкие пески, цементы низкой активности.

При определении состава бетона формулу прочности обычно используют для назначения водоцементного отношения, обеспечивающего заданную прочность бетона при определенной активности цемента. Чтобы определить, какую из формул использовать в том или ином случае, сравним прочность бетона и цемента при  $\text{В/Ц} = 0,4$ , наиболее часто применяемом при определении прочности портландцемента. В этом случае в среднем при  $A = 0,6$ .

$$R_g = 0,6R_{ц} (2,5-0,5) = 1,2R_{ц}. \quad (19)$$

Таким образом, прочность бетона оказывается на 10–30 % (при  $A = 0,55-0,65$ ) выше прочности стандартного цементного раствора. Это можно объяснить, с одной стороны, тем, что цементный раствор вследствие особенностей структуры и приготовления имеет большую пористость (на 3–5 %), чем бетон, а с другой стороны, применением однофракционного окатанного вольского песка, что также снижает прочность раствора (по нашим опытам, прочность раствора на вольском песке была на 15–25 % ниже прочности раствора на хорошем строительном песке при одинаковых значениях водоцементного отношения).

Формулу (18) следует применять при  $R_g \geq 2 AR_{ц}$ .

## Практическое занятие к теме 2

*Цель* — изучить и освоить методику ускоренной оценки качества (активности) цемента в бетоне и назначение состава бетона требуемой прочности.

Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначение состава бетона рекомендуется применять в заводских условиях при отсутствии данных об активности цемента.

Для ускорения оценки качества цемента в бетоне и одновременного назначения состава бетона требуемой прочности используется линейная зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения  $R_g = f(C/V)$ .

Для этого достаточно приготовить бетонные смеси с тремя водоцементными (0,7–0,36) или соответственно с цементно-водными (1,43–2,8) отношениями. Из этих смесей изготовить образцы, которые следует или пропарить, или выдержать в условиях нормальной температуры и влажности и испытать на сжатие в суточном или ином возрасте. По полученным данным строят зависимость  $R_g = f(C/V)$ . Использование накопленных



данных и графиков позволяет установить цементно-водное отношение для получения требуемой прочности бетона в заданное время, на основе которого и определяется состав бетона.

Группа, состоящая из трех бригад, готовит три состава бетонной смеси с цементно-водным отношением соответственно 1,43; 2,0; 2,8. Расход материалов на замес, из которого может быть отформовано по 9 образцов с размером ребра 100 мм каждого состава бетонной смеси, приведен в табл. 4. В скобках — расход материалов на изготовление трех образцов.

Каждая бригада готовит замес и определяет среднюю плотность бетонной смеси, подвижность (см) или жесткость (с).

Из каждого состава бетонной смеси формуют девять (три) образцов. Смесь уплотняют на виброплощадке до полного прекращения ее оседания, выравнивания и появления на всей поверхности цементного раствора.

Таблица 4

Расход материалов на замес

Состав бетонной смеси	Ц/В, В/Ц	Расход материалов на замес, кг				
		Цемент	Песок	КЗ	Вода	Вода на поглощение КЗ
1	1,43/0,7	2,5 (0,83)	8,3 (2,77)	13,5 (4,50)	1,74 (0,58)	$\frac{КЗ \times W_{\text{м}}}{100}$
2	2,0/0,5	3,6 (1,2)	7,5 (2,50)	12,3 (4,10)	1,8 (0,60)	$\frac{КЗ \times W_{\text{м}}}{100}$
3	2,8/0,36	7,7 (2,57)	4,5 (1,5)	10,6 (3,53)	2,73 (0,91)	$\frac{КЗ \times W_{\text{м}}}{100}$

*Примечания.* 1. Расход материалов на замес дан с некоторым избытком.  
2. Для образцов-кубов с ребром 150 мм расход каждого материала следует умножить на 3,4.

После выдерживания в течение 2 ч шесть образцов каждого состава подвергают тепловой обработке при атмосферном давлении по следующему режиму:

- если бетонная смесь изготовлена на портландцементе, то 3 ч — подъем, 6 ч — выдержка при температуре изотермического прогрева 80–85 °С и 2 ч — охлаждение;
- если использован шлакопортландцемент или пуццолановый портландцемент, то 3 ч — подъем, 8 ч — выдержка при температуре изотермического прогрева 90–95 °С и 2 ч — охлаждение.

Оставшиеся три образца каждого состава выдерживают в течение 1 сут в формах при комнатной температуре.

Через 12 ч с момента отключения пара образцы извлекают из форм. Три образца испытывают для определения прочности на сжатие по ГОСТ 10180–2012. Три пропаренных образца и три образца, не подвергавшихся пропариванию, каждого состава извлекаются из форм и помещают в камеру нормального твердения для определения прочности бетона при сжатии в возрасте 28 сут.

По результатам испытания образцов на сжатие определяют среднюю прочность бетона каждого состава, которая приводится к прочности кубов с ребром 150 мм с помощью переводных коэффициентов (масштабный фактор).

Для построения зависимости  $R_6 = f(C/V)$ , где  $R_6$  — прочность бетона при сжатии, по горизонтальной оси откладывают значения  $C/V$ , а по вертикальной — прочность бетона при сжатии (МПа).

На рис. 11 прямая  $R_1$  выражает зависимость  $R_1 = f(C/V)$ , где  $R_1$  — прочность бетона при сжатии, испытанного через 12 ч после тепловой обработки. В случае, если прямая не проходит через три точки и какая-нибудь из них по ординате отклоняется более чем на 10 %, то опыт необходимо повторить.

Для выбора  $C/V$  и для получения бетона заданной прочности на заводе достаточно построить функцию  $R_1 = f(C/V)$ . При этом если после остывания бетона требуется получить, например, прочность бетона при сжатии, равную 70 %-ной заданной

прочности 20 МПа, т.е. необходимо найти Ц/В для прочности 14 МПа, то через точку, соответствующую этой прочности, на оси ординат надо провести прямую, параллельную оси абсцисс до пересечения с прямой  $R_1$ .

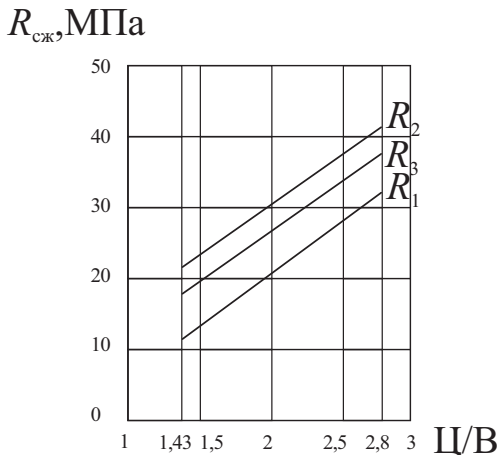


Рис. 11. Прочность бетона при сжатии в зависимости от Ц/В:

$R_1$  — испытанного через 12 ч после пропаривания;  $R_2$  — то же, через 27 сут последующего нормального твердения;  $R_3$  — нормального твердения в возрасте 28 сут

Точка на абсциссе дает искомую величину Ц/В = 1,6. Если же требуется получить заданную прочность сразу после остывания, линию, параллельную оси абсцисс, следует провести через точку ординаты, соответствующую 20 МПа. В этом случае Ц/В = 2.

Когда требуемая прочность должна быть обеспечена к возрасту 28 сут, необходимо построить функцию  $R_3 = f(\text{Ц/В})$ , где  $R_3$  — прочность бетона при сжатии нормального твердения в возрасте 28 сут (рис. 11). Если необходимо иметь прочность пропаренного бетона через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях, нужно построить функцию  $R_2 = f(\text{Ц/В})$ , где

$R_2$  — прочность пропаренного бетона при сжатии, испытанного через 27 сут., последующего нормального твердения (рис. 11).

Для построения функций  $R_3 = f(C/V)$  и  $R_2 = f(C/V)$  можно воспользоваться значениями  $M$ , приведенными в табл. 5, и вычислить соответственно  $R_3$  и  $R_2$  при двух других значениях  $C/V$ , например 1,43 и 2,8. Ниже приводится пример расчета и построения этих зависимостей.

Пример расчета. Пусть прочность бетона после пропаривания при  $C/V = 1,43$  равна 11,5 МПа, а при  $C/V = 2,8$  — 31 МПа.

Тогда, используя данные табл. 5, получим

а) для  $R_3$ :

при  $C/V = 1,43$   $R_3 = R_1 M/100 = 11,5 \cdot 158/100 = 18,2$  МПа;

при  $C/V = 2,80$   $R_3 = R_1 M/100 = 31 \cdot 120/100 = 37,2$  МПа.

На рис. 11 —  $R_3 = f(R_1)$ ;

б) для  $R_2$ :

при  $C/V = 1,43$   $R_2 = R_1 M/100 = 11,5 \cdot 177/100 = 20,4$  МПа;

при  $C/V = 2,80$   $R_2 = R_1 M/100 = 31 \cdot 135/100 = 42$  МПа.

На рис. 11 —  $R_2 = f(R_1)$ .

Таблица 5

Показатели прочности бетона в зависимости от цементно-водного отношения

Ц/В	$R_2 = f(R_1)$			$R_3 = f(R_1)$			$R_1 = f(R_{II})$			$R_2 = f(R_{II})$			$R_1 = f(R_3)$			$R_2 = f(R_3)$		
	$M$	$S$	$C_v$	$M$	$S$	$C_v$	$M$	$S$	$C_v$	$M$	$S$	$C_v$	$M$	$S$	$C_v$	$M$	$S$	$C_v$
1,43	177	44	25	158	37	23	27	10	37	44	16	36	67	14	21	116	18	15
2,00	148	23	16	131	22	17	54	10	20	71	12	20	78	11	15	115	17	15
2,50	138	24	17	123	20	17	72	12	17	96	19	20	81	13	16	112	16	14
2,80	135	22	17	120	28	18	85	16	15	110	20	18	83	14	17	110	16	14
	$R_2 = R_1 M/100$			$R_3 = R_1 M/100$			$R_1 = R_{II} M/100$			$R_2 = R_{II} M/100$			$R_1 = R_3 M/100$			$R_2 = R_3 M/100$		
							$R_{II} = R_1 100/M$			$R_{II} = R_2 100/M$								

Примечания: 1.  $M$  — среднее значение коэффициента прочности, %;  $S$  — среднее квадратическое отклонение, %;  $C_v$  — коэффициент вариации, %.  
2.  $R_1$  и  $R_2$  соответственно прочность пропаренного бетона, испытанного через 12 ч после отключения пара и через 27 сут последующего твердения в нормальных условиях;  $R_3$  — прочность бетона нормального твердения в возрасте 28 сут.

Приведенные расчеты, выполненные с привлечением данных табл. 5, проверяют при испытании образцов, выдержанных после пропаривания 27 сут в нормальных условиях, и образцов, не подвергшихся пропариванию, выдержанных в нормальных условиях 28 сут.

Для определения активности применяемого для бетона цемента используется зависимость  $R_1 = f(R_{ц})$ , (см. табл. 5). Как функция  $R_{ц}$ ,  $R_1$ , может быть установлена при различных значения Ц/В. Поэтому необходимо принять то Ц/В, которому соответствует наименьшая величина коэффициента вариации  $C_v$ . Из табл. 5 видно, что наименьшей величиной  $C_v$  является 15%. Тогда  $R_{ц}$  определяют по формуле, приведенной в табл. 5:

$$R_{ц} = R_1 100/M, \quad (20)$$

где  $M = 85\%$ .

При Ц/В = 2,8 (табл. 5 и рис. 11)  $R_1 = 31$  МПа. Тогда  $R_{ц} = 31 \times 100/85 = 36,5$  МПа.

Полученные результаты оформляются в форме отчета, который — один на бригаду и содержит титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты. Приводится цель работы и исходные данные.

Приводится краткое описание методики приготовления бетонной смеси с указанием расхода материалов по примеру табл. 5, расчет прочности цемента в составе бетона и построение зависимости прочности бетона при сжатии от Ц/В.

В конце — заключение по работе.

---

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

**Б**етонные смеси, применяемые для изготовления изделий, в большинстве случаев подвергаются уплотнению. На свойства бетона еще большее влияние, чем перемешивание, оказывает уплотнение бетонной смеси. Недоуплотнение приводит к резкому уменьшению прочности бетона, ухудшает его долговечность и другие свойства (рис. 12).

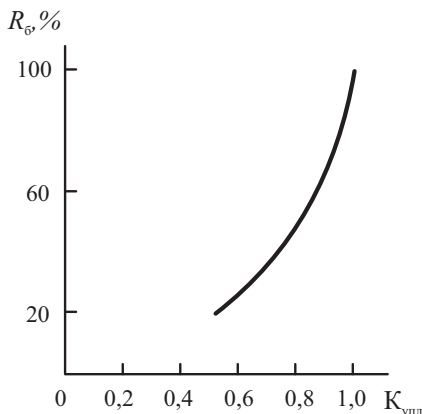


Рис. 12. Влияние относительной степени уплотнения ( $K_{упл}$ ) бетона на его прочность при сжатии  $R_b$

Частицы бетонной смеси в процессе уплотнения находятся под влиянием силового поля, слагаемого из сил тяжести частиц и внешнего силового воздействия (давление, встряхивание, колебательные движения), оказываемого на эти частицы. Кроме того, частицы находятся под воздействием внутренних сил в системе (силы вязкого и сухого трения, межмолекулярного сцепления, капиллярного давления и др.), величина которых определяет физико-механические свойства бетонной смеси и ее реологические характеристики.

Основным способом механического воздействия на бетонную смесь с целью ее уплотнения является вибрирование. Качество уплотнения бетонной смеси определяется выбранным режимом виброобработки, ее интенсивностью и продолжительностью, а также соответствием выбранных параметров режима вибрирования свойствам бетонной смеси.

Эффективность вибрирования при формировании изделий оценивается достижением в оптимальные сроки хорошего и равномерного уплотнения. Она косвенно может быть оценена прочностью затвердевшего бетона, которая, как известно, является функцией его плотности. На заводах сборного железобетона изделия обычно формируют на специальных виброплощадках, монолитный бетон в конструкциях уплотняют глубинными (подвижные бетонные смеси) и поверхностными вибраторами.

При вибрировании частицам бетонной смеси сообщаются механические колебания, в результате чего связи между частицами постоянно нарушаются, силы трения и сцепления уменьшаются. Бетонная смесь приобретает свойства тяжелой жидкости и под влиянием сил тяжести расплывается, заполняя форму, и уплотняется.

Для уплотнения особо жестких смесей применяют вибрирование с пригрузом, вибропрессование и виброштампование. Для формирования труб часто используют центрифугирование. Известны и другие способы уплотнения бетонной смеси, одна-

ко требования к ним одинаковые — они должны обеспечивать заданную степень уплотнения бетонной смеси. Для обычной тяжелой бетонной смеси коэффициент уплотнения, т. е. отношение фактической плотности к расчетной, должен быть не менее 0,98 и приближаться к 1.

Степень уплотнения бетонной смеси характеризуется коэффициентом уплотнения бетонной смеси, который подсчитывается как отношение фактической (опытной) средней плотности бетонной смеси к расчетной (теоретической) средней плотности полностью уплотненной бетонной смеси  $m_v^p$ .

Для определения коэффициента уплотнения бетонной смеси необходимо знать расход материалов (на 1 м<sup>3</sup> бетона или на замес), а также плотность исходных материалов. Расчетная средняя плотность полностью уплотненной бетонной смеси подсчитывается как отношение масс исходных материалов (израсходованных на 1 м<sup>3</sup> бетона или на замес) к сумме их абсолютных объемов.

*Пример расчета.* Определить коэффициент уплотнения смеси  $K_{упл}$  при расходе материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона: цемента 285 кг, воды 175 л, песка 650 кг, щебня 1200 кг. Плотность цемента — 3 кг/л; песка — 2,6; щебня — 2,58; воды — 1.

*Решение.* Коэффициент уплотнения можно подсчитать двумя способами.

1. Подсчитываем  $K_{упл}$  как отношение суммы абсолютных объемов материалов, содержащихся в 1 м<sup>3</sup> уплотненной смеси, к фактическому объему смеси (с учетом содержащихся в ней воздушных пустот).

Сумма абсолютных объемов материалов:

$$(285/3) + (175/1) + (650/2,6) + 1200/(2,58) = 985 \text{ л} = 0,985 \text{ м}^3.$$

2. Подсчитываем  $K_{упл}$  как отношение средних плотностей.

Расчетная средняя плотность:



$$m_v^p = (285 + 175 + 650 + 1200)/0,985 = 2347 \text{ кг/м}^3.$$

Опытная (фактическая) средняя плотность определялась по известной методике и составила  $m_v^{\text{ф}} = 2300 \text{ кг/м}^3$ .

$$K_{\text{упл}} = m_v^{\text{ф}} / m_v^p = 2300/2347 = 0,979.$$

Эффект виброуплотнения зависит от частоты колебания  $f$  и амплитуды  $A$ . Наиболее достоверным критерием эффективности вибрирования является показатель интенсивности вибрации  $I$  ( $\text{см}^2/\text{с}^3$ ). Интенсивность вибрации характеризует поток энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади вибрируемой бетонной смеси:

$$I = A^2 \cdot f^3, \quad (21)$$

где  $A \cdot f$  — путь, совершаемый колеблющейся частицей в единицу времени, т. е. скорость колебания;  $A \cdot f^2$  — ускорение колебаний.

На рис. 13 приведен график для выбора параметров вибраций в зависимости от заданной ее интенсивности. Заштрихованная площадь соответствует наиболее распространенным на практике частотам и амплитудам вибраций. Для крупнозернистых тяжелых бетонных смесей амплитуда обычно равна 0,3–0,7 мм, причем с повышением жесткости бетонной смеси ее увеличивают (при жесткости 4–6 с,  $A = 0,3$ –0,4 мм, при жесткости 8–10 с,  $A = 0,6$ –0,7 мм). Для мелкозернистых бетонных смесей амплитуда равна 0,15–0,4 мм, при этом целесообразно увеличивать частоту вибрации. Слишком большие амплитуды колебаний без пригруза могут вызвать разрыхление бетонной смеси и ухудшить свойства бетона.

Для каждой бетонной смеси при принятых параметрах колебаний имеется оптимальная продолжительность вибрирования.

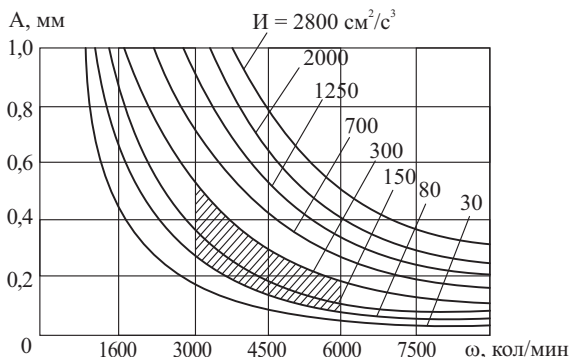


Рис. 13. Зависимость между амплитудами  $A$  и частотами колебаний  $\omega$  при различной интенсивности вибрации  $I$

При недостаточной продолжительности вибрирования наблюдается недоуплотнение бетона и снижение его прочности, слишком длительное вибрирование не дает заметного повышения плотности и прочности бетона (рис. 14). Кроме того, длительное вибрирование пластичных смесей может вызвать их расслоение. Обычно продолжительность вибрирования принимают в 8–10 раз больше показателя жесткости  $J_{ст}$  бетонной смеси, определенной стандартным методом [ $f = (3000 \pm 200)$  кол/мин,  $A = 0,5$  мм], т. е.  $t_{в} = (8–10)J_{ст}$ .

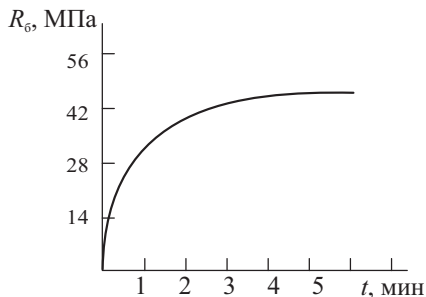


Рис. 14. Влияние продолжительности вибрирования на прочность бетона

Расчет параметров колебаний виброплощадки производится следующим образом. Для определения величины амплитуды вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы можно воспользоваться эмпирической формулой

$$A = Q / [(F - M)\omega^2 - E], \quad (22)$$

где  $Q$  — возмущающая сила, Н;  $F$  — коэффициент сопротивления;  $M$  — вибрируемая масса (включая массу формы и бетонной смеси), Н;  $\omega$  — угловая скорость, рад/с;  $E$  — суммарная жесткость пружин виброплощадки, Н·см<sup>-1</sup>.

Возмущающая сила

$$Q = P_e \cdot \omega^2 / g, \quad (23)$$

где  $P_e$  — кинетический момент дебалансов виброплощадки, Н·см;  $g$  — ускорение силы тяжести, см·с<sup>-2</sup>.

Коэффициент сопротивления  $F$  зависит от колеблющейся массы и частоты колебаний и устанавливается опытным путем. Для виброплощадок небольшой грузоподъемности (100–200 кг) коэффициент сопротивления

$$F = K \cdot M, \quad (24)$$

где  $K = 2,1 - (f/10000)$ ;  $f$  — число колебаний в минуту.

$$f = \omega / 2\pi.$$

Определение частоты собственных колебаний виброплощадки проводим по формуле

$$f_0 = 10 \sqrt{\frac{E}{(F - M)}}. \quad (25)$$

Критерии интенсивности колебаний можно определить:

- по наибольшей скорости колебаний (см · с<sup>-1</sup>):  $v_{\max} = A\omega = A2\pi f$ ;
- по наибольшему ускорению, сообщаемому частицам смеси (см · с<sup>-2</sup>):  $W_{\max} = A\omega^2 = A4\pi^2 f^2$ ;

- по интенсивности вибрирования ( $\text{см}^2 \cdot \text{с}^3$ ):  $\omega^2 = A^2\omega^3 = A^28\pi^3f^3$ ,

где  $A$  — амплитуда, см;  $\omega$  — угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $f$  — частота колебаний, Гц.

### Практическое занятие к теме 3

*Цель* — ознакомиться с методами расчета параметров вибрирования бетонной смеси при ее уплотнении и установить зависимость прочности бетона от способа уплотнения бетонной смеси.

Работа проводится группой из нескольких бригад. Бригады в соответствии с заданием преподавателя:

- рассчитывают расход материалов на необходимое количество образцов;
- рассчитывают по известным конструктивным параметрам лабораторной виброплощадки величину амплитуды и частоту собственных колебаний в зависимости от массы формуемого бетона;
- рассчитывают критерии интенсивности и интенсивность колебаний;
- формуют образцы бетонной смеси способами, обеспечивающими  $K_{\text{упл}} = 0,98; 0,93; 0,9$ ;
- определяют прочность образцов в заданном возрасте;
- производят обработку результатов эксперимента и устанавливают графическую зависимость влияния степени уплотнения бетонной смеси, приготовленной при одинаковом В/Ц, на прочность бетона.

Из приготовленной бетонной смеси в соответствии с составом, предложенным преподавателем, формуются девять кубов с ребром 10 см, по три куба способом, обеспечивающим  $K_{\text{упл}}$ , соответствующий данным табл. 6.

Таблица 6

Значения  $K_{упл}$  бетонной смеси в зависимости от способа уплотнения

Способ уплотнения бетонной смеси	Значение коэффициента уплотнения
Вибрирование	0,98
Штыкование	0,93
Свободная укладка	0,90

При формировании образцов измеряют среднюю плотность бетонной смеси, определяют фактический расход компонентов на  $1 \text{ м}^3$ . После истечения установленных сроков твердения у бетонных образцов определяют среднюю плотность и прочность при сжатии по методикам, приведенным в практическом занятии к теме 1.

Полученные результаты оформляются в форме отчета, который оформляется один на бригаду и содержит титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты. Приводится цель работы и исходные данные.

Дается краткое описание методики приготовления бетонной смеси, определения средней плотности.

Указываются расчет расхода компонентов бетонной смеси на один замес и расчет выхода бетонной смеси и фактического расхода компонентов на  $1 \text{ м}^3$ . Результаты испытаний заносятся в табличную форму:

Характеристика бетонных смесей

Номер замеса	В/Ц	$\rho_{б.см}^*$ кг/м <sup>3</sup>	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>					Расход материалов, кг, на $1 \text{ м}^3/6,5 \text{ л}$					
			Ц	П	КЗ	В	Д	Ц	П	КЗ	В	Д	
1													
2													

Кратко описывается методика формирования образцов.

Рассчитывается амплитуда вынужденных колебаний виброплощадки. Результаты заносят в табличную форму:

Основные параметры виброплощадки

Масса формируемого образца, кг	Кинетический момент виброплощадки $P_e$ , Н см	Амплитуда колебаний виброплощадки $A$ , см	Частота собственных колебаний виброплощадки, $F_0$ , кол/мин

Производится расчет интенсивности вибрирования.

Результаты определения прочности бетона оформляются в виде таблицы. По полученным данным строится график зависимости прочности бетонов от степени уплотнения бетонной смеси.

В конце приводится заключение.

---

## 4. ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ БЕТОНА И АРМАТУРЫ

**Б**етон, как и другие каменные материалы, плохо сопротивляется изгибу и растяжению, однако в сочетании с арматурой его механические свойства значительно улучшаются. Улучшению механических свойств бетона способствует хорошее сцепление его с арматурой, обеспечивающее рациональное распределение нагрузки между этими материалами. Важным для совместной работы является и то, что температурное расширение стали и бетона, близкое по значению, сводит к минимуму внутренние напряжения в зоне контакта при изменении температуры, и, кроме того, бетон надежно защищает арматуру от коррозии. Поэтому конструкции из бетона армируют. Для повышения сцепления применяют арматуру периодического профиля, а также сварные сетки и каркасы.

Сцеплением арматуры с бетоном называется непрерывная связь по поверхности контакта между арматурой и бетоном, обеспечивающая их совместную работу. Сцепление арматуры с бетоном обуславливает их сопротивление взаимному сдвигу. Общее сопротивление сдвигу определяется следующими основными физико-механическими факторами:

- сопротивлением бетона смятию и срезу вследствие наличия выступов и неровностей арматуры;

- силами трения вследствие обжатия арматурных стержней;
- склеиванием арматуры с бетоном вследствие адгезии цементного клея.

На долю этих факторов относят 70–75, 15–20 и до 10 % общего обычно сопротивления сдвигу.

Определение прочности сцепления арматуры с бетоном не регламентируется стандартами. Однако в ряде случаев, учитывая важность совместной работы арматуры и бетона (для изгибаемых элементов при нарушении сцепления арматуры с бетоном потеря несущей способности составляет 30–35 %), необходимо определить прочность сцепления  $\tau_{\text{сц}}$  или ее изменение под действием различных технологических факторов во времени вследствие коррозии и т. п. Вопросы методики испытаний по определению прочности сцепления бетона с арматурой разработаны в «Рекомендациях по испытаниям на сцепление арматуры с бетоном» Р-36–67 (М., 1973) и некоторых других работах.

При изготовлении образцов, кроме общих требований, необходимо обеспечить следующие условия. Арматура перед установкой в форму для обетонирования должна быть тщательно очищена от смазки, загрязнений и продуктов коррозии. Оставлять последние можно, если изучение их влияния является целью испытаний. Арматурные стержни должны быть ровными (допускаются искривления не более 3 мм на 1 м), без видимых дефектов поверхности. Замеры производят с погрешностью не более 0,1 мм для диаметра  $d$  и шага вмятин; 0,05 мм для глубины профилировки стержневой и 0,02 мм для проволочной арматуры. Арматурные стержни должны быть жестко и надежно укреплены в форме для предупреждения их перемещения при укладке и уплотнении бетонной смеси. При уплотнении смеси глубинными вибраторами последние не должны касаться арматурных стержней.

В местах прохождения арматурных стержней через стенки формы необходимо обеспечить, например с помощью резино-



вых колец, уплотнение для предотвращения вытекания цементного «молока» при вибрации.

Следует обязательно учитывать направление вибрирования по отношению к арматуре и угол  $\psi$  между направлением вибрирования и направлением усилия в арматуре при испытании. При этом возможны случаи, когда:

- арматурный стержень при бетонировании расположен горизонтально и  $\psi = 90^\circ$ ;
- арматурный стержень при бетонировании расположен вертикально и при испытании усилие в нем — по направлению бетонирования, т. е.  $\psi = 0^\circ$ ;
- арматурный стержень при бетонировании расположен вертикально, но при испытании усилие в нем направлено в противоположную усилию бетонирования сторону, т. е.  $\psi = 180^\circ$ . В этом случае обычно  $\tau_{\text{сц}}$  максимальна.

Различие в последних двух случаях обусловлено седиментационным расслоением бетонной смеси под выступами арматуры периодического профиля.

Размеры образцов рекомендуется назначать с обеспечением наименьшего поперечного размера призмы  $a$ , из условия  $a = 5(d + 1)$  см, и длины по табл. 7. При этом для образцов из бетона на пористых заполнителях вместо  $R_{\text{сж}}$  бетона следует принимать  $R_{\text{сж}}$  растворной составляющей.

Таблица 7

Рекомендуемые длины призм

$R_{\text{сж}}$ , МПа	Длина призмы, мм, при $d$ , мм		
	<10	10–20	>20
<15	30	40	50
15–30	25	30	40
>30	20	25	30

При необходимости исследования сцепления арматуры с инъекционным раствором изготавливают бетонные образцы со сквозными каналами, помещают в них арматуру и заполняют их раствором.

Для испытания на сцепление могут применяться различные способы (см. рис. 15), каждый из которых имеет свои особенности. Значение  $\tau_{\text{сц}}$ , полученное в одних и тех же условиях, но разными способами, различно, поэтому при описании результатов следует обязательно указывать способ испытания.

По способу (см. рис. 15, а) стержни в середине плиты разделены на две части. При этом способе отсутствует поперечное давление. Способ целесообразно использовать при исследовании сцепления арматуры с инъекцированным в каналы (трубы) раствором.

По способу (см. рис. 15, б) усилие растяжения в арматурном стержне уравнивается усилием в петле. При этом возможны два варианта: по первому — петля свободно проходит через каналы в призме и закрепляется на торцах анкерами; по второму — петля удерживается силами сцепления в бетоне.

По способу (см. рис. 15, в) испытание состоит в выдергивании арматурного стержня с упором призмы в торец. Вследствие упора призмы в торец траектории главных сжимающих напряжений в бетоне образуют свод, который вызывает обжатие стержня и повышает  $\tau_{\text{сц}}$ . Следует отметить, что поскольку при испытании по способу (см. рис. 15, а) максимальные напряжения достигаются только на одном стержне, оставшийся в призме стержень можно выдернуть этим же методом. При этом, несмотря на то, что сцепление стержня частично нарушено, зачастую отмечается более высокое усилие вырыва по способу (см. рис. 15, в), чем по способу (см. рис. 15, д).

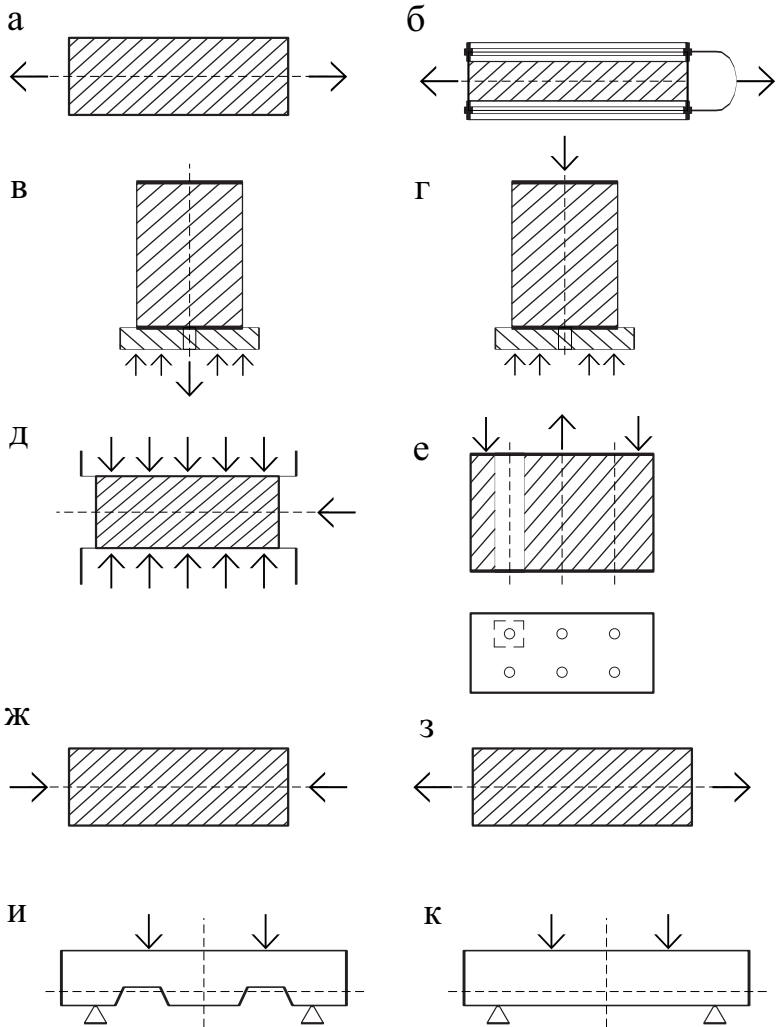


Рис. 15. Схемы испытания сцепления арматуры с бетоном

Довольно часто применяют способ продавливания (рис. 15, г). Значение  $\tau_{\text{сн}}$ , полученное этим способом, выше, чем полученное предыдущим (рис. 15, б), поскольку нагрузка, приложенная к арматурному стержню, вызывает увеличение его сечения, что в свою очередь увеличивает силы, повышающие сопротивление сдвигу. Трудность реализации способа состоит в необходимости обеспечить точное центрирование нагрузки, так как даже при малых эксцентриситетах наблюдается продольный изгиб арматуры. Это ограничивает применение способа, особенно для проволочной арматуры малых диаметров.

Возможно испытание способом (рис. 15, д), при котором растягивающее усилие в арматурном стержне уравнивается силами трения, действующими по двум граням бетонной призмы, например при обжатии ее между опорными плитами прессы.

Известен способ выдергивания арматурных стержней из бетонного массива (см. рис. 15, е). Поскольку процент армирования близок к нулю, напряженное состояние бетона мало влияет на получаемые результаты. Опоры вырывного устройства следует размещать на достаточном расстоянии от стержня, к которому приложена нагрузка. Вторая разновидность способа состоит в том, что в массив замоноличивают призмы с заранее установленными в них арматурными стержнями, после чего проводят испытание по обычной схеме. Этот вариант дает возможность применять при изготовлении призм такие условия формования и твердения, использование которых при изготовлении массива затруднительно, неэкономично или даже невозможно.

Способ (см. рис. 15, ж) основан на передаче предварительных напряжений на бетон от арматуры, освобожденной от упоров. На концевых участках возникают две симметрично расположенные зоны анкеровки, в пределах которых действуют напряжения сцепления. Способ по характеру возникающих напряжений близок к способу продавливания.

Способ (см. рис. 15, з) основан на растяжении арматурного стержня, забетонированного в призму. Напряжения противоположны по знаку тем, которые возникают при способе (см. рис. 15, ж).

Способ (см. рис. 15, и) основан на испытании железобетонной балки на изгиб. В растянутой зоне арматура на некоторых участках обнажена, что дает возможность измерить деформации.

Способ (см. рис. 15, к) отличается от предыдущего тем, что арматурный стержень, уложенный в растянутой зоне балки, имеет выпуски за пределы торцов ( $l_{ст} > l_{балк}$ ), по изменению длины которых определяют момент нарушения сцепления.

Наиболее часто при испытаниях применяют довольно простые способы выдергивания стержня с упором призмы в торец (рис. 15, в) и продавливания (см. рис. 15, г), хотя такое простое напряженное состояние в практике встречается сравнительно редко. В процессе загрузки образца для исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном измеряют смещение арматуры относительно бетона на торцах образца  $g_0$  (на загруженном конце) и  $g_1$  (на незагруженном конце), а также напряжения в арматуре.

Величину  $\tau_0$  можно определять по усилию (нагрузку — по силоизмерителю; площадь поперечного сечения для стержня периодического профиля вычисляют косвенным методом — путем взвешивания) или по продольной деформации арматуры, измеряемой с помощью тензометров или тензодатчиков (предварительно определяют диаграмму растяжения арматуры).

Перемещения  $g_0$  и  $g_1$  наиболее удобно измерять механическим методом с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. Крепить индикаторы можно как к бетону, так и к арматуре с помощью закладных деталей, струбцин или клея (рис. 16); в последнем случае используют дополнительную крышку для защиты индикатора. При креплении индикатора к арматуре с помощью струбцин, расстояние от последних до поверхности бетонного образца должно быть минимальным (~ 10–15 мм).

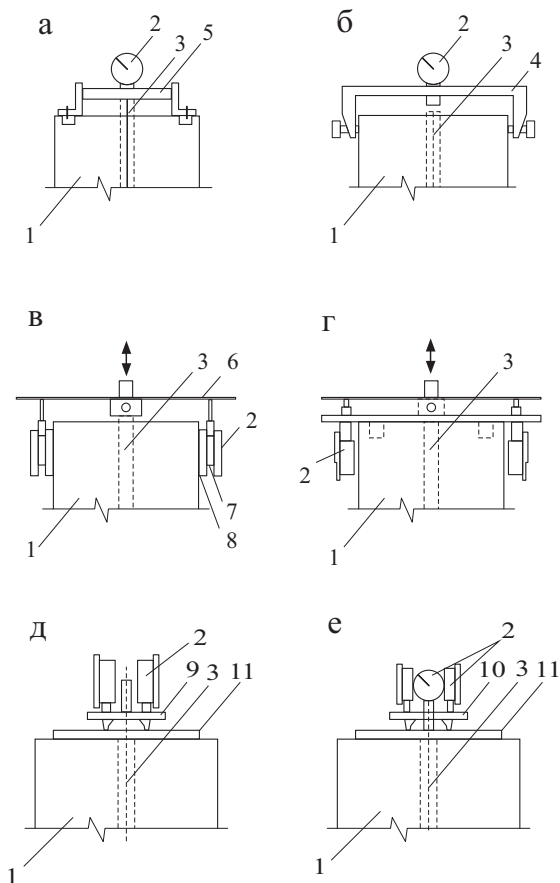


Рис. 16. Схемы испытания сцепления арматуры с бетоном:

- а, б, в, г — крепление к бетону; д, е — крепление к арматурному стержню;  
 1 — бетонный образец; 2 — индикатор, 3 — арматурный стержень;  
 4 — струбцина; 5 — зажимная планка; 6 — съемный упор; 7 — защитная крышка; 8 — слой клея; 9 — струбцина на два индикатора; 10 — струбцина на четыре индикатора; 11 — опорная пластина

Испытание проводят при плавном нагружении по этапам по 10–15% ожидаемой предельной нагрузки. Первые два-три и последний этапы целесообразно принимать по 5–7%. Скорость возрастания нагрузки должна соответствовать приросту  $\tau_0$  на 5 МПа/с. Выдержку под нагрузкой перед снятием отсчетов принимают 1 мин, если деформация при этом продолжается, то выдержку увеличивают до тех пор, пока деформация не будет менее 0,01 мм за 1 мин.

За начало сдвига арматуры принимают момент, соответствующий началу деформаций на ненагруженном конце  $g_1$ . Однако следует учесть, что незначительные первичные деформации, особенно при испытании арматуры периодического профиля, не соответствуют сдвигу арматуры, а характеризуют обжатие образца.

Если испытание доведено до выдергивания арматуры, то можно рассчитать среднее условное напряжение сцепления  $\tau_{сц}^{cp}$  по формуле

$$\tau_{сц}^{cp} = P/(\pi d_{ср} l), \quad (26)$$

где  $P$  — предельное усилие в стержне, Н (кгс);  $d_{ср}$  — средний диаметр стержня (для периодической арматуры вычисленный методом взвешивания), м (см);  $l$  — длина забетонированной части стержня, м (см).

Кроме того, во всех случаях возможно построение графика зависимости  $g_0$  от  $\tau_0$  и определение ряда других параметров.

Прочность сцепления арматуры с бетоном может быть определена и при длительном нагружении; при этом возможно исследовать и дополнительное влияние различных факторов: времени твердения, попеременного замораживания и оттаивания и т. п.

## Практическое занятие к теме 4

*Цель* — изучить и освоить методику определения прочности сцепления арматуры с бетоном, определить влияние вида, ха-

рактера поверхности арматуры, ее обработки на прочность сцепления.

Работа проводится группой из нескольких бригад. Бригады в соответствии с заданием преподавателя:

- рассчитывают расход материалов на необходимое количество образцов;
- готовят арматуру для испытаний — очищают поверхность стержней, покрывают защитной обмазкой, определяют размеры, взвешивают и др.;
- формируют 12 образцов-кубов с ребром 10 см, из них 9 образцов с арматурными стержнями, три — без арматуры. Арматурные стержни устанавливают в отверстия на боковых стенках формы, закрепляют и герметизируют в них пластилином;
- через сутки образцы распалубливают и хранят до испытаний в нормальных условиях либо подвергают ТВО;
- в заданном возрасте определяют прочность сцепления арматуры с бетоном способом продавливания по схеме (см. рис. 15, г), а три образца без арматуры испытывают на прочность;
- производят обработку результатов эксперимента, обобщая данные, полученные всеми бригадами, определяют соотношение прочности сцепления арматуры с прочностью бетона, фиксируют выявленные зависимости и представляют их в графическом виде.

Полученные результаты оформляются в форме отчета, который — один на бригаду и содержит титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты.

Указывается краткое описание методики приготовления бетонной смеси и подготовки арматурных стержней, определение и расчет диаметра исследуемой арматуры. Результаты определений и расчета заносятся в следующую табличную форму:



### Диаметр арматурных стержней

Номер стержня	$d$ в точке 1, мм	$d$ в точке 2, мм	$d$ в точке 3, мм	$d_{\text{ср}}^{\text{ПП}}$ , мм	$m$ , г	$d_{\text{ср}}^{\text{ПП}}$ , мм
1						
2						
...						

Описывается методика формования образцов, определения прочности бетона. Результаты представляются в виде табличной формы.

### Прочность сцепления арматуры с бетоном и бетона

Номер образца	Вид арматуры	Качество арматуры	$d_{\text{ср}}$ , мм	$\tau_{\text{сц}}^{\text{ср}}$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$R_{\text{сж}}$ , МПа
1					
2					

Строится график зависимости прочности сцепления арматуры с бетоном от вида и качества арматуры и сравнение показателей сцепления с прочностью бетона. В конце приводится заключение.

---

## 5. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ И ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

### 5.1 Физико-химические основы влияния ПАВ на процессы гидратации и твердения портландцементов

Скорость химических реакций гидратации минералов портландцементного клинкера, состав продуктов гидратации, а также кинетика формирования структуры твердеющего цементного камня изменяются в зависимости от многих факторов, среди которых одним из важнейших является водоцементное отношение — В/Ц. Величина В/Ц оказывает существенное влияние на связи между частицами, возникающие благодаря близости поверхности, и пористость твердого тела, играющих основную роль в процессе формирования структуры и прочности цементного камня.

Известно много способов уменьшения величины В/Ц: изменение минералогического и вещественного состава цемента, его дисперсности и гранулометрии, подбор оптимального состава бетона, введение химических добавок и т. д.

Одним из наиболее эффективных способов снижения водоцементного отношения цементных суспензий, растворных

и бетонных смесей при сохранении неизменной подвижности является применение химических добавок — пластификаторов, относящихся к классу поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Большое количество ПАВ, разнообразие методов их получения и применения вызвали необходимость их классификации.

*Химические добавки, их классификация.* По Ребиндеру П.А. все ПАВ, адсорбирующиеся из водной среды поверхностями клинкерных минералов и продуктами их гидратации, делят на две группы:

- органические ПАВ гидрофильного типа, повышающие или не уменьшающие степень смачивания цемента водой. К этой группе ПАВ относятся СНВ (смола нейтрализованная воздухововлекающая), СДБ (сульфитно-дрожжевая бражка), суперпластификаторы С-3, 10–03, 20–03 и др. Каждая молекула таких соединений содержит определенное число функциональных групп разной полярности;
- органические ПАВ гидрофобного типа, понижающие смачиваемость цемента водой. К этой группе относятся кремнийорганические соединения, жирные нафталиновые смоляные кислоты и их соли, которые адсорбируются на поверхности цементных частиц и химически ориентируют полярные группы добавки с образованием нерастворимых кальциевых мыл на поверхности частиц.

В соответствии с ГОСТ 24211–2008 существует следующая классификация органических добавок для бетонов и строительных растворов:

1. *Добавки, регулирующие свойства бетонных и растворных смесей:*

- пластифицирующие (суперпластифицирующие, пластифицирующие);
- водоредуцирующие (суперводоредуцирующие, водоредуцирующие);
- стабилизирующие;
- регулирующие сохраняемость подвижности;
- увеличивающие воздухо- (газо) содержание.

2. *Добавки, регулирующие свойства бетонов и растворов:*

- регулирующие кинетику твердения (ускорители, замедлители);
- повышающие прочность;
- снижающие проницаемость;
- повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре;
- повышающие морозостойкость;
- повышающие коррозионную стойкость;
- расширяющие.

3. *Добавки, придающие бетонам и растворам специальные свойства:*

- противоморозные (для «холодного» бетона, для «теплого» бетона);
- гидрофобизирующие.

В ГОСТ 24211–2008 приведены критерии эффективности пластифицирующих добавок (табл. 8).

С 2008 года в технологии бетона применяют методики оценки эффективности всех видов добавок описанные в ГОСТ 30459–2008.

*Таблица 8*

Показатели основного эффекта действия  
и критерии эффективности добавок

Класс и подкласс добавок	Основной эффект	Показатель основного эффекта действия добавок	Критерий эффективности добавок
Пластифицирующие	Пластификация смесей	Увеличение подвижности (при снижении прочности бетона не более чем на 5%):	—
Суперпластифицирующие Пластифицирующие		бетонной смеси	От П1 до П5
		бетонной смеси	От П1 до П2-П4

Возрастающий ассортимент пластифицирующих добавок повышенной эффективности — суперпластификаторов привел к необходимости их классификации по химическому составу, согласно которой они разделены на 4 группы:

- водорастворимые сульфонированные меламинаформальдегидные смолы или комплексы на их основе;
- продукты поликонденсации нафталинсульфокислот с формальдегидом или комплексы на их основе;
- очищенные или модифицированные лигносульфаты и комплексы на их основе;
- прочие СП, например, полигидроксильные высшие карбоновые кислоты, водорастворимые олигомеры акрилатного ряда и др.

## 5.2. Эффективность действия добавок ПАВ

*Улучшение смачиваемости цемента и заполнителей.* Добавки ПАВ облегчают растекание воды тонким слоем по поверхности твердых частиц, входящих в состав бетонной смеси. Но тончайшие слои воздуха, адсорбированного на зернах цемента, песка и щебня в свою очередь препятствуют их смачиванию. Однако ПАВ обладают способностью эмульгировать воздух в воде, и по этой причине добавки ПАВ облегчают смачивание компонентов бетона.

*Дефлокулирующее действие ПАВ на цемент.* При взаимодействии воды с цементом его зерна частично слипаются, не успев прореагировать с водой. Следовательно, в цементном тесте содержится некоторое количество скоплений цементных частиц. Такие агрегаты при своем образовании захватывают воду, поэтому ее приходится вводить в большом количестве, что теоретически необходимо, чтобы повысить пластичность системы. В таких агрегатах не только вода, но и сам цемент не использует-

ся полностью. Рядом исследователей установлено, что добавки ПАВ являются дефлокулянтами цемента, повышая тем самым эффективность его использования.

*Пластифицирующее действие ПАВ.* При изготовлении бетонов и растворов всегда приходится решать основную противоречивую задачу: нужно ввести много воды в бетонную смесь, так как иначе трудно ее перемешать и уложить, а вместе с тем необходимо вводить как можно меньше воды, чтобы получить прочный и плотный камень. Цементное тесто в бетоне можно считать минеральным клеем для песка и щебня. Портландцемент в процессе твердения способен химически связать лишь 20–25 % массы воды. При этом образуются твердые гидратные соединения, которые обуславливают прочность бетонов. Между тем, при изготовлении бетонной смеси вынуждены расходовать 40–55 % воды от массы цемента, а в строительные растворы вводить 50–60 % воды. Такое значительное количество воды нужно не для протекания химических процессов твердения, а для того чтобы получить смесь, достаточно удобную в работе при данных методах укладки и уплотнения.

Известно, что увеличение расхода воды отрицательно сказывается на свойствах бетона. Та вода, которая не вошла в химические реакции с цементом, испаряется из бетона при его твердении, вызывая значительную его усадку и оставляя поры. При этом понижается прочность бетонов, повышается способность поглощать воду и агрессивные жидкости.

Существует возможность уменьшить водоцементное отношение, изготавливая жесткие бетонные смеси, укладываемые при помощи вибрирования. Но операция вибрирования не поддается автоматизации, требует большой затраты тяжелого физического труда, обходится дорого.

Другой, более эффективный метод уменьшения количества воды затвердения — это использование ПАВ. Эти добавки с успехом можно применять в любых бетонах. С помощью до-

бавок ПАВ можно уменьшить В/Ц в бетонах на 10–12 %, а в растворах — на 12–14. Для получения заданной прочности можно, снижая количество воды, уменьшить расход цемента на 8–10 %.

*Уменьшение экзотермии бетона.* Чем меньше расход цемента при изготовлении бетона, тем ниже его экзотермия. При возведении многих монолитных бетонных конструкций, например гидротехнических, необходимо, чтобы экзотермия бетона была по возможности невысокой, иначе возникают градиенты температур в бетоне, так как наружные слои бетонной конструкции охлаждаются водой или воздухом, а ее ядро — центральная часть, может нагреваться. При этом возникают напряжения в бетоне, могут возникнуть трещины. Введение добавок ПАВ позволяет снизить расход цемента и тем самым уменьшить экзотермию бетона.

*Повышение жизнеспособности бетонных смесей и растворов.* Использование добавок ПАВ позволяет повысить жизнеспособность бетонных смесей, что особенно важно при их современном централизованном производстве на автоматизированных установках. Часто проходит 1,5–3 часа с момента изготовления смесей до их применения. В этот период нередко начинается схватывание смесей, возникают производственные потери, ухудшаются свойства затвердевших материалов. Для предотвращения преждевременного загустевания смесей и применяют соответствующие добавки ПАВ.

*Поризация легких бетонов.* Добавки некоторых ПАВ, вызывая вовлечение воздуха в бетонные смеси, способствуют уменьшению объемной массы легких бетонов и вместе с тем улучшают другие свойства материалов, например морозостойкость.

Таким образом, наряду с достижением экономии цемента, добавки ПАВ содействуют увеличению производительности труда в строительстве и улучшению его качества, способствуя, в частности, созданию долговечных бетонных конструкций, что существенно повышает эффективность капиталовложений.

### 5.3. Определение состава бетона с химическими добавками

С каждым годом расширяется номенклатура добавок, используемых для улучшения свойств бетонной смеси и бетона. Однако это не требует применения для каждого вида добавок особых методов проектирования его состава. Определение состава бетона в этом случае производят на основе единой методики, с учетом влияния добавок на основные зависимости «состав–свойство», используемые в расчетах.

При этом учитывают, что добавки не изменяют характера зависимостей, в частности зависимостей подвижности бетонной смеси от расхода воды и прочности бетона, от активности цемента и цементно-водного отношения, а только изменяют количественное соотношение между разными факторами. Величина подобных изменений зависит от дозировки добавки и может быть учтена на основе рекомендаций, содержащихся в технических условиях, или инструкции по применению данной добавки или установлена по результатам предварительных опытов.

На рис. 17 и 18 показано влияние добавок пластификатора и суперпластификатора на зависимость подвижности бетонной смеси от расхода воды. Введение добавок способствует повышению подвижности смеси и уменьшает расход воды, необходимый для получения равноподвижных смесей, однако основная зависимость  $OK = f(W)$  имеет одинаковый характер и в обычном бетоне, и в бетоне с добавками. Изменяются только положение кривой и соответственно получаемые по ней количественные результаты. Если известно, что добавка уменьшает водопотребность бетонной смеси на 10 или 20 %, то можно построить соответствующие кривые и по ним определять расход воды, требуемый для получения заданной подвижности смеси.



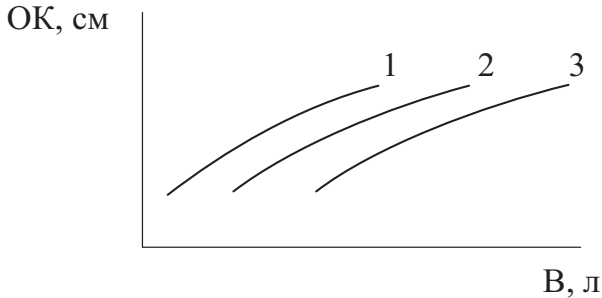


Рис. 17. Влияние добавок на водопотребность бетонной смеси:

1 — бетонная смесь с суперпластификатором; 2 — то же, с СДБ;  
3 — то же, без добавки

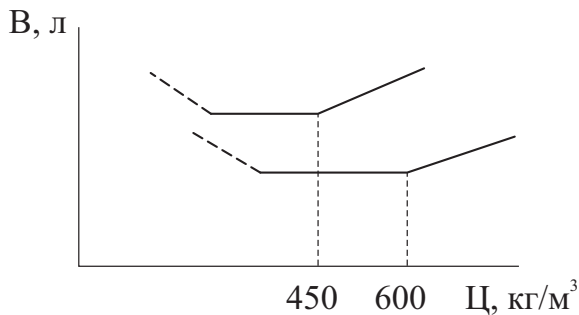


Рис. 18. Влияние суперпластификатора на зависимость водопотребности бетонной смеси от расхода цемента:

1 — с суперпластификатором; 2 — без добавки

При введении комплексных добавок влияние их на водопотребность бетонной смеси можно оценивать по виду и дозировке пластифицирующего компонента. При введении ускорителей твердения ориентировочно можно считать, что зависимость подвижности смеси от расхода воды в этом случае не изменяется

и определять расход воды по рекомендациям для обычного бетона без добавки.

В бетонной смеси при расходе цемента от 200 до 450 кг изменение содержания цемента практически так мало сказывается на изменении водопотребности, что этим влиянием пренебрегают. В этом случае говорят о законе постоянства водопотребности бетонной смеси. Введение пластификаторов и суперпластификаторов не нарушает этой закономерности, но изменяет количественное значение водопотребности и пределы, в которые проявляется эта зависимость (см. рис. 18). Введение этих добавок не только уменьшает водопотребность бетонной смеси, но и смещает верхний предел в сторону больших расходов цемента, т.е. закон постоянства водопотребности бетонных смесей сохраняется при введении пластификаторов до расхода цемента  $500\text{--}550\text{ кг/м}^3$ , а при введении суперпластификатора до  $550\text{--}600\text{ кг/м}^3$ , поэтому при высоких расходах цемента в этом случае не надо вводить дополнительную дозу цемента, которая рекомендована для бетонов без добавок.

Эффект воздействия суперпластификатора на бетонную смесь зависит от количества введенной добавки и минералогического состава цемента. Однако влияние второго фактора невелико и может быть учтено соответствующей корректировкой содержания добавки: при применении алюминатных цементов дозировка добавки увеличивается на  $0,1\text{--}0,2\%$  массы цемента.

Сравнение пластифицирующего действия на бетонную смесь различных суперпластификаторов показало, что оно приблизительно одинаково. Например, при содержании добавки  $1\%$  массы цемента и расходе цемента  $500\text{ кг/м}^3$  снижение водопотребности (величина редуцирования воды  $\Delta B$ ) для разных добавок колебалась от 23 до 25%.

При определении состава для пробных замесов можно принимать средние значения  $\Delta B$ , которые зависят от дозировки суперпластификатора: при дозировке  $0,5\%$  массы цемента расход

можно уменьшить на 15, а каждое последующее увеличение дозировки на 0,25 % снижает расход воды еще на 4–5.

## **Практическое занятие к теме 5**

*Цель* — изучить влияние добавки суперпластификатора на удобоукладываемость бетонной смеси и ее изменение во времени, цементно-водное отношение; прочность тяжелого бетона.

Работа проводится группой из нескольких бригад. Бригады в соответствии с заданием преподавателя:

- рассчитывают расход материалов на необходимое количество образцов;
- формируют необходимое количество образцов-кубов с ребром 10 см, в соответствии с выбранным вариантом:

*Вариант 1.* Формование образцов из бетонной смеси одинаковой подвижности без модификатора и с различным количеством модификатора.

*Вариант 2.* Формование образцов из бетонной смеси без модификатора и с различным количеством модификатора при одинаковом В/Ц.

- определяют подвижность бетонной смеси всех составов;
- через сутки образцы распалубливают и хранят до испытаний в нормальных условиях либо подвергают ТВО;
- в заданном возрасте определяют прочность образцов на сжатие;
- производят обработку результатов эксперимента, обобщая данные, полученные всеми бригадами, определяют соотношение прочности бетона с добавками и без, фиксируют выявленные зависимости и представляют их в графическом виде;
- результаты выполненных экспериментов и расчетов оформляют в виде отчета, в котором приводится титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты, цель и исходные данные.

Кратко описываются методики приготовления бетонной смеси и определения удобоукладываемости. Указывается выбранный вариант выполнения работы. Результаты заносятся в следующую табличную форму:

Характеристика бетонных смесей

Номер замеса	В/Ц	Вид и кол-во Д, %	$\rho_{б.см}^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Подвижность, см	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
					Ц	П	КЗ	В	Д
1									
2									

Кратко описываются методики формования образцов и определения прочности. Результаты заносятся в табличную форму:

Механическая прочность и средняя плотность бетона

Наименование показателей	Номер образца			
	1	2	3	Среднее
Масса, кг				
Размеры, см: длина ширина высота				
Объем, см <sup>3</sup>				
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>				
Разрушающая нагрузка, Н (кгс)				
Предел прочности при сжатии в возрасте _____ сут				

Полученная прочность приводится к стандартным параметрам по размерам образцов, влажности, возрасту твердения. Строятся графики зависимости расхода воды и прочности бетона от вида и количества добавок. Проводится заключение на соответствие полученных результатов поставленным задачам.

---

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УСКОРЕНИЕ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Для ускорения твердения бетона в нормальных условиях при возведении здания монолитным способом или при изготовлении железобетонных изделий в заводских условиях пользуются различными приемами активации цемента:

- дополнительное измельчение цемента сухим или мокрым способом (с возможным дополнительным введением при помолу 2–3 % гипса);
- уменьшение воды затворения за счет использования пластифицирующих добавок, в том числе и добавок суперпластификаторов;
- применение быстротвердеющих или особо быстротвердеющих вяжущих (БТЦ, ОБТЦ или других);
- введение химических добавок, ускоряющих твердение бетона.

Исходя из производственных условий, в каждом конкретном случае может быть использован один (или сочетание) из указанных выше приемов.

Для получения цемента клинкер размалывают в тонкий порошок. Для регулирования сроков схватывания и интенсивности твердения в шихту вводят 2–5 % гипса, количество которого

определяется минералогическим составом клинкера. Стандартом допускается добавление к клинкеру активных минеральных добавок (гидравлических добавок, шлаков, зол), содержание которых может достигать 5 % без изменения названия «портландцемент».

Размол клинкера с добавками в цемент — энергоемкая операция. При общем расходе энергии 325–550 МДж на 1 т цемента на размол клинкера расходуется 125–180 МДж. Поэтому важно знать, каким образом можно получить максимальную производительность при минимальном удельном расходе энергии. Рядовой цемент характеризуется удельной поверхностью 250–300 м<sup>2</sup>/кг. Увеличение удельной поверхности с 260 до 300 м<sup>2</sup>/кг вызывает заметное падение производительности мельницы (рис. 19). Еще большее падение производительности наблюдается при переходе к удельной поверхности 400–500 м<sup>2</sup>/кг при получении быстротвердеющего цемента (БТЦ). Поэтому технологические схемы и размольные установки должны проектироваться исходя из возможности получения высокой производительности при обеспечении высокой тонкости продукта.

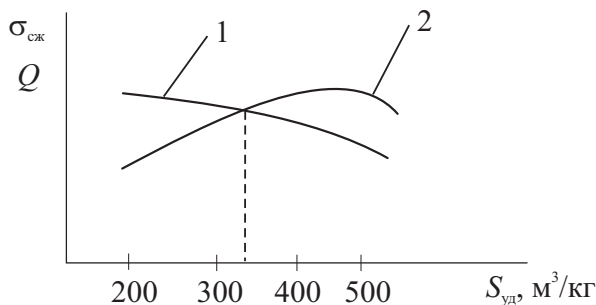


Рис. 19. Изменение производительности мельницы и активности цемента в зависимости от дисперсности материала:

1 — производительность мельницы; 2 — прочность цементного камня при сжатии

Большое влияние на прочность цемента, как в ранние, так и в поздние сроки твердения, оказывает минералогический состав клинкера. Последний при получении БТЦ должен содержать повышенные количества быстро твердеющих клинкерных минералов — трехкальциевого силиката и трехкальциевого алюмината при соответственно уменьшенном количестве менее активных — двухкальциевого силиката и алюмоферритной фазы. Иными словами, цемент должен быть алюминатно-алитовым с повышенными значениями коэффициента насыщения и глиноземного модуля. Оптимальный минералогический состав клинкера на каждом заводе устанавливается с учетом особенностей сырья и технологического оборудования. В порядке общих соображений можно указать, что расчетное содержание  $C_3S$  должно находиться в пределах 50–55, а  $C_3A$  — 8–11; в сумме  $C_3S + C_3A$  должны составлять 60–65 %.

Часто применяемым технологическим приемом повышения скорости твердения БТЦ является более тонкий по сравнению с обычным портландцементом помол клинкера. БТЦ размалывают до удельной поверхности 350–450 вместо обычных 250–300 м<sup>2</sup>/кг. Влияние этого фактора на интенсивность нарастания прочности цемента иллюстрируется данными, приведенными в табл. 9. Эти данные показывают, что увеличение тонкости помола цемента особенно значительно сказывается на его прочности в первые сутки твердения. Повышение удельной поверхности цемента целесообразно только до известного предела, после которого дальнейшее увеличение прочности не наблюдается даже в ранние сроки.

Чрезмерно тонкий помол имеет и свои отрицательные стороны: резко снижается производительность мельниц, сильно возрастает расход электроэнергии на помол, очень быстро снижается активность тонкомолотого цемента при его хранении. Для устранения последнего явления необходимо упаковывать тонкомолотые цементы в специальную битуминированную влаго-

и воздухонепроницаемую бумажную тару или добавлять к нему при помоле гидроболизующие добавки.

Таблица 9

Влияние тонкости помола портландцемента на его прочность в разные сроки твердения

Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Предел прочности растворов жесткой консистенции, кгс/см <sup>2</sup>							
	при сжатии				при растяжении			
	в возрасте, сут				в возрасте, сут			
	1	3	7	28	1	3	7	28
1100	68	162	245	365	8	16	19	26
2300	156	325	520	696	14	25	32	38
3900	348	491	595	725	23	29	35	42
5000	406	527	603	712	25	32	37	41
9000	459	573	612	719	30	31	36	42

В связи с быстрым снижением активности БТЦ при его хранении предпочитают иногда клинкер на цементных заводах подвергать нормальному помолу, а затем домальвать цемент на заводах железобетонных изделий непосредственно перед применением в производстве. Домол цемента в этом случае производят либо в вибромельницах, либо в шаровых мельницах мокрым способом в присутствии воды.

Следует указать, что БТЦ должен быть не только достаточно тонко размолот, но и иметь определенный зерновой состав цементного порошка.

## Практическое занятие к теме 6

*Цель* — исследовать влияние различных факторов на ускорение твердения бетона в нормальных условиях (без тепловой обработки).



Необходимо изучить влияние активации цемента на ускорение процесса твердения бетона в нормальных условиях. Работа проводится группой из нескольких бригад. Бригады в соответствии с заданием преподавателя:

- домалывают исходный цемент до удельной поверхности 3500, 4500 и 5500  $\text{см}^2/\text{г}$ ;
- рассчитывают расход материалов на необходимое количество образцов;
- формируют необходимое количество образцов-кубов с ребром 10 см, используя цемент разной степени дисперсности с подбором одинаковой подвижности 5–6 см;
- через сутки образцы распалубливают и хранят до испытаний в нормальных условиях;
- в заданном возрасте определяют прочность образцов на сжатие;
- производят обработку результатов эксперимента, обобщая данные, полученные всеми бригадами, определяют соотношение прочностей бетона на цементах разной степени дисперсности, фиксируют выявленные зависимости и представляют их в графическом виде;
- результаты выполненных экспериментов и расчетов оформляют в виде отчета, который — один на бригаду и содержащий титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты.

Приводятся краткое описание методов активации цемента, методики повышения удельной поверхности цемента, приготовления бетонной смеси и определения удобоукладываемости. Кратко описываются методики формирования образцов и определения прочности. Результаты заносятся в следующие табличные формы:

### Характеристика бетонных смесей

Номер замеса	$S_{уд}$ цемента, см <sup>2</sup> /г	В/Ц	$\rho_{б,см}$ , кг/м <sup>3</sup>	Подвижность, см	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
					Ц	П	КЗ	В	Д
1	Исходная								
2	3500								
3	4500								
4	5500								

### Механическая прочность и средняя плотность бетона

Наименование показателей	Номер замеса			
	1	2	3	4
Масса, кг				
Размеры, см: длина, ширина, высота				
Объем, см <sup>3</sup>				
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>				
Разрушающая нагрузка, Н (кгс)				
Предел прочности при сжатии в возрасте _____ сут.				

Полученная прочность приводится к стандартным параметрам по размерам образцов, влажности, возрасту твердения. Строятся графики зависимости расхода воды и прочности бетона от степени дисперсности цемента. Проводится заключение на соответствие полученных результатов поставленным задачам.

---

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ

Особенность неразрушающих методов контроля прочности заключается в контроле свойств материала или конструкции по косвенным характеристикам. В этом случае не нужно выпиливать или выбуривать из конструкции образцы для испытания. Это не приводит к снижению несущей способности испытываемых конструкций.

Классифицируются неразрушающие методы контроля по физической основе:

- на механические (склерометрические методы определения поверхностной твердости, методы частичного разрушения бетона);
- акустические;
- электромагнитные;
- радиометрические;
- комбинированные [10].

Эти методы можно использовать для определения следующих свойств строительных конструкций:

- механических (механические методы и ультразвуковой импульсный);
- влажности (радиометрический и электромагнитный);
- упругих свойств (ультразвуковой импульсный и резонансный звуковой);

- физической и химической коррозии (ультразвуковой импульсный, резонансный звуковой, радиометрический);
- определения дефектов (ультразвуковой импульсный и радиометрический);
- свойств арматуры (радиометрический и электромагнитный).

## 7.1 Механические методы

*Склерометрические методы определения твердости.* Сущность этих методов основана на зависимости предела прочности при сжатии бетона и его поверхностной твердости. Использование этих методов ограничено и зависит от зоны испытания конструкции, вида крупного заполнителя, класса бетона, толщины конструкции и т. п. К таким методам относятся метод упругого отскока и метод отпечатков.

Метод отскока основан на том, что передвигающаяся масса ударяет по поверхности бетона с определенной начальной энергией, которая частично поглощается бетоном, а оставшаяся часть приводит в движение исходную массу. Характеристикой твердости служит высота отскока бойка прибора  $A$ , падающего с заданной высоты  $H$ . Чем больше  $A$ , тем выше ударная твердость материала.

Все устройства, применяемые для метода отскока, используют упругую энергию пружин, обеспечивающих постоянную энергию удара. К ним относятся молоток Шмидта (рис. 20), маятниковый прибор НИИСМИ, прибор КМ. Молоток Шмидта предпочтительнее использовать для массивных изделий и конструкций, изготовленных из бетонов средних и высоких классов.

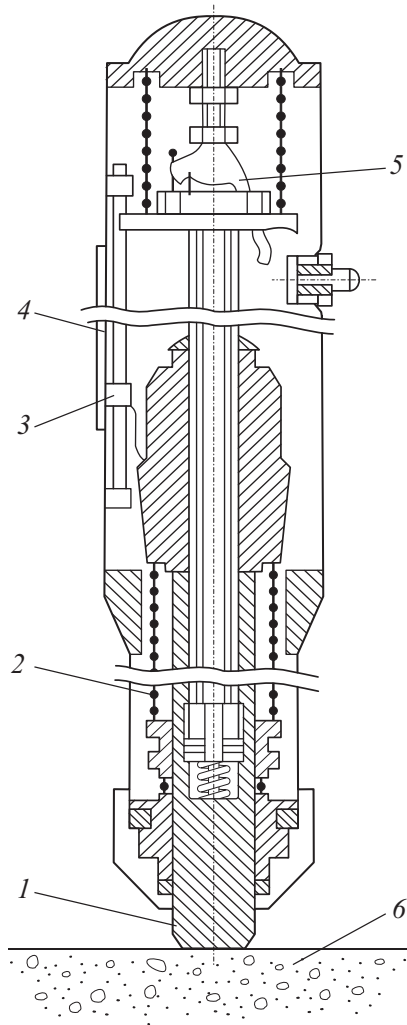


Рис. 20. Молоток Шмидта:

1 — ударник; 2 — пружина; 3 — ползунок; 4 — шкала прибора;  
5 — фиксирующее устройство; 6 — поверхность бетона

Метод отпечатков основан на том, что прочность определяют по размеру отпечатка (пластической деформации), полученного от вдавливания индентора в поверхность бетона. В качестве инденторов применяют стальные шарики, диски или штампы.

Прочность бетона определяют по эмпирическим зависимостям, учитывая обратно пропорциональную зависимость прочности при сжатии и размера отпечатка на поверхности бетона. Обычно вдавливание осуществляют под действием ударного усилия.

При применении метода отпечатков используют следующее приборы:

- ударные молотки с эталонным стержнем: при определении прочности сравнивается отпечаток на бетоне с отпечатком на эталонном стержне (молоток Кашкарова);
- ударные молотки с заданной массой и энергией удара, при определении прочности измеряется только отпечаток непосредственно на бетоне (прибор КМ, ударный молоток типа ХПС, дисковые приборы);
- гидравлические штампы: при определении прочности измеряется только размер вмятины на поверхности бетона после плавного вдавливания штампа.

ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» устанавливает условия проведения испытаний бетона с использованием средств неразрушающего контроля, но при прочих равных условиях на показания приборов будут влиять:

- влажность бетона (упругость влажного бетона, особенно при влажности более 2%, значительно ниже сухого);
- вид крупного заполнителя и глубина его расположения (щебень из твердых горных пород, расположенный на малой глубине, может завышать показания в 0,4–2 раза,

щебень из мягких пород, наоборот, занижает показания примерно в 0,4 раза);

- низкая отрицательная температура (показатели увеличиваются при температуре ниже  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- размер арматуры (при диаметре более 12 мм и защитном слое менее 10 мм могут увеличиваться показания приборов упругого отскока).

*Методы, связанные с частичным разрушением бетона.* Методы пластической деформации обладают несколькими недостатками: глубина и размер отпечатков, как правило, невелики, а с увеличением прочности бетона эти параметры становятся еще меньше, что резко снижает точность определения прочности. Помимо этого, на размер отпечатка будут влиять шероховатость поверхности, вид смазки, влажность бетона. Этих негативных влияний можно избежать, используя методы, связанные с частичным разрушением бетона.

К таким методам относятся: метод стрельбы, метод вырывания стрежня, метод отрыва, метод скалывания и метод отрыва со скалыванием. Наиболее распространены последние три метода.

Метод отрыва сводится к отрыву заранее приклеенного диска известного диаметра к бетонной поверхности. Прочность на отрыв определяется по формуле

$$R_{\text{отр}} = k (N_{\text{отр}}/S), \quad (27)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий размер стального диска;  $N_{\text{отр}}$  — усилие отрыва, Н;  $S$  — площадь стального диска,  $\text{м}^2$ .

Метод скалывания основан на определении усилия скалывания участка бетона, расположенного на ребре конструкции. Обычно для этого испытания используют устройства типа ОНИКС (рис. 21).



Рис. 21. Устройство для определения прочности методом скалывания «ОНИКС-1.СР» [13]

Метод отрыва со скалыванием основан на определении усилия, необходимого для отрыва и скалывания куска бетона из конструкции. Для этого в теле бетона устанавливают анкерное устройство, которое при достижении контрольных сроков выдергивают с помощью специальных приборов (рис. 22, 23). Для исследования бетона методом отрыва со скалыванием применяются те же приборы, что и для метода отрыва: ПИБ; ОНИКС-ОС; ПОС-50 МГ4; ГПНС-5; ГПНВ-5.

Анкерные устройства могут устанавливаться до бетонирования и в готовые конструкции.





Рис. 22. Измеритель прочности бетона  
ПОС-50 МГ4 «СКОЛ» [14]



Рис. 23. Измеритель прочности бетона «ОНИКС-ОС» [15]

## 7.2. Акустические методы

Методы основаны на определении акустических характеристик, связанных с распространением звуковых и ультразвуковых колебаний или ударных волн в бетоне (частоты колебаний, скорости и затуханий звука).

Акустические методы эффективно использовать для определения:

- упругих характеристик (модуля упругости, модуля сдвига);
- неупругих характеристик (вязкости, пластичности);
- структурных характеристик и дефектов (плотности, дефектов);
- механических свойств.

Основные преимущества акустических методов:

- отсутствие разрушающих воздействий испытываемого материала;
- возможность проведения повторного испытания конструкций;
- быстрота определения свойств и мгновенность получения результатов.

К акустическим методам относятся: ультразвуковой импульсный, резонансный и ударный методы. *Ультразвуковой импульсный метод* основан на определении скорости распространения ультразвуковых колебаний в материале и на существовании зависимости между изменением прочности и модуля упругости бетона в ходе твердения. Скорость ультразвука пропорциональна динамическому модулю и обратно пропорциональна плотности бетона. Для ультразвукового прозвучивания бетона применяют приборы типа ПУЛЬСАР (рис. 24).



Рис. 24. Измеритель прочности бетона «ПУЛЬСАР» [16]

### 7.3. Факторы, влияющие на скорость распространения звука в бетоне

*Вид крупного заполнителя, количество и зерновой состав.*  
Динамический модуль упругости крупного заполнителя значительно выше по сравнению с модулем цементного камня, в результате даже минимальное повышение количества щебня повышает скорость ультразвука, при этом прочность бетона практически не изменяется. Такое же явление наблюдается при использовании более плотного и прочного заполнителя, однако механические и упругие свойства крупного заполнителя, начиная с определенных значений, не оказывают сильного влияния на прочность бетона. Бетон на крупном заполнителе со значительным модулем упругости и цементном камне небольшой

прочности будет обладать низкой прочностью, но скорость распространения звука в нем будет высокой. Изменение зернового состава заполнителя почти не влияет на градуировочную зависимость. При этом необходимо испытывать образцы требуемого размера, в 4–5 раз большего, чем максимальный размер заполнителя.

*Вид и количество цемента.* Вид цемента не влияет на зависимость «скорость звука-прочность», она сохраняется постоянной. Повышение расхода цемента увеличивает скорость звука медленнее, чем прочность бетона. При увеличении количества цемента до предельного значения скорость начинает уменьшаться, хотя прочность бетона продолжает повышаться. Это зависит от того, что прочность бетона характеризуется по большей части прочностью растворной части, находящейся в пространстве между щебнем, а скорость распространения звука в бетоне зависит от скорости распространения в крупном заполнителе.

*Вид и количество песка.* Аналогично виду цемента вид песка не оказывает значительного влияния на точность определения свойств рассматриваемым методом. Но изменение количества песка сильно сказывается на определении прочности бетона. Например, изменение П/Ц на 10 % при одинаковом количестве щебня изменяет прочность бетона на 1,0–1,5 МПа, при этом скорость распространения звука практически не меняется.

*Водоцементное отношение.* Снижение количества воды приводит к повышению плотности, прочности и упругих свойств, следовательно, скорость будет расти.

*Время и режим твердения.* Резкое изменение режима твердения значительно изменяет прочность бетона, а на модуль упругости практически не влияет. Поэтому нужно применять определенные градуировочные зависимости для каждого режима ТВО. При построении этих зависимостей обязательно учитывается влияние влажности и температуры бетона. Наличие влаги в бетоне значительно повышает скорость звука в нем. При нор-

мальных условиях твердения величина скорости будет меняться благодаря изменению упругих свойств. Можно выделить три основных периода твердения:

1. Начальный (индукционный): длится 2–3 часа, скорость распространения звука растет незначительно. В конце этого периода наступает схватывание цемента;

2. Схватывание: скорость звука в этот период возрастает в 6–9 раз за несколько часов;

3. Период твердения: нарастание величины скорости звука замедляется и к концу этого периода становится в 1,5–2,0 раза больше по сравнению с предыдущим периодом.

*Степень уплотнения бетона.* Недоуплотнение смеси на 5% снижает прочность примерно на 25% при постоянной скорости звука. Следовательно, ультразвуковой метод необходимо применять на бетонах с практически одинаковой степенью уплотнения.

Помимо указанных факторов, проведение ультразвуковых испытаний необходимо проводить в соответствии с методиками, изложенными в ГОСТ 17624–2012 с обязательным построением градуировочных кривых для каждого прибора.

*Резонансный метод.* Этот метод эффективнее использовать в лабораторных условиях при контроле физико-механических свойств бетона с течением времени (морозостойкости, химической стойкости и т. п.). Резонансный метод сводится к определению частоты собственных колебаний исследуемых образцов с дальнейшим расчетом модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона и декремента затухания. А по определенным динамическим характеристикам определяют прочностные свойства бетона. Кроме этого резонансный метод хорошо подходит для оценки скорости твердения бетонов, кинетики роста прочности и упругих свойств.

*Ударный метод.* Метод базируется на измерении скорости распространения продольных волн, вызванных механическим ударом по бетону. По испытываемой части конструкции удара-

ют ручным или электрическим молотком и измеряют скорость звукового импульса. Недостатком этого метода является неточность измерения скорости низких звуковых частот, поэтому его эффективнее использовать при исследовании массивных конструкций, а также для дорожного и аэродромного бетона.

#### **7.4. Электромагнитные методы**

Методы основаны на выявлении зависимости магнитного сопротивления между полюсами преобразователя от положения стальной арматуры относительно полюсов. Их предпочтительнее использовать для выявления дефектов в металлоконструкциях, определения расположения арматуры в бетоне, ее диаметра и толщины защитного слоя, а также влажности конструкций. К электромагнитным методам относятся метод поглощения электромагнитных волн и метод электромагнитной индукции.

#### **7.5. Радиометрические методы**

Методы основаны на законах радиоактивного распада химических элементов и возникновении соответствующих излучений, которые можно отследить. Используют эти методы проникающую радиацию. В зависимости от вида и источника излучений различают фотографический метод, ионизационный, метод интроскопии, нейтронный метод, метод гамма-излучения.

### **Практическое занятие к теме 7**

*Цель* — изучить и освоить методику определения прочности бетона неразрушающим (ультразвуковым) способом, срав-

нить результаты определения прочности бетона разрушающим и неразрушающим способами.

Работа проводится группой из нескольких бригад. Бригады в соответствии с заданием:

- рассчитывают расход материалов на необходимое количество образцов;
- формируют необходимое количество образцов-кубов с ребром 10 см;
- через сутки образцы распалубливают и хранят до испытаний в нормальных условиях либо подвергают ТВО;
- изучают руководство по эксплуатации прибора «Пульсар-1», используемого для ультразвукового метода определения прочности;
- в заданном возрасте определяют прочность образцов на сжатие двумя методами: разрушающим и неразрушающим;
- производят обработку результатов эксперимента, определяют соотношение прочностей бетона, определенных разными методами, фиксируют выявленные зависимости и представляют их в графическом виде;
- результаты выполненных экспериментов и расчетов оформляют в виде отчета, который оформляется один на бригаду и содержит титульный лист с указанием названия работы, номера группы, фамилий студентов, даты.

Приводится краткое описание методики приготовления бетонной смеси и формирования образцов. Характеристика смесей оформляется в виде табличной формы.

Характеристика бетонных смесей

Номер замеса	В/Ц	$\rho_{б.см}^*$ , кг/м <sup>3</sup>	Фактический расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
			Ц	П	КЗ	В	Д
1							
2							

Указывается краткое описание разрушающих и неразрушающих методов определения прочности бетона, работы прибора «Пульсар-1». Результаты определения прочности заносятся в следующую табличную форму:

Механическая прочность и средняя плотность бетона

Наименование показателей	Номер образца						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
Масса, кг							
Размеры, см: длина, ширина, высота							
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>							
Разрушающая нагрузка, Н (кгс)							
Предел прочности при сжатии в возрасте _____ сут, МПа							
Скорость распространения звука в бетоне, м/с							
Предел прочности при сжатии в возрасте _____ сут (неразрушающий метод), МПа							

Строятся графики зависимости прочности бетоном от выбранных параметров, определенных двумя методами. Проводится заключение на соответствие полученных результатов поставленным задачам.



---

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ферронская А. В. Лабораторный практикум по курсу «Технология бетонных и железобетонных изделий» : учеб. пособие для вузов / А. В. Ферронская, В. И. Стамбулко. — Москва : Высш. шк., 1988. — 222 с.

2. Баженов Ю. М. Технология бетонных и железобетонных изделий : учебник для вузов / Ю. М. Баженов, А. Г. Комар. — Москва : Стройиздат, 1984. 672 с.

3. ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. — Введ. 2015.07.01. — Москва : Стандартиформ, 2015. — 28 с.

4. ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия. — Введ. 2012.01.01. — Москва : Стандартиформ, 2011. — 19 с.

5. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. — Введ. 2013.07.01. — Москва : Стандартиформ, 2013. — 35 с.

6. ГОСТ 12730.1–78. Бетоны. Методы определения плотности. — Введ. 1980.01.01. — Москва: Стандартиформ, 2007. — 5 с.

7. ГОСТ 12730.5–84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. — Введ. 1985.07.01. — Москва : Стандартиформ, 2007. — 12 с.

8. ГОСТ 24211–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. — Введ. 2011.01.01. — Москва : Стандартиформ, 2010. — 16 с.

9. ГОСТ 30459–2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. — Введ. 2011.01.01. — Москва : Стандартинформ, 2010. — 18 с.

10. Семяняк Г. С. Неразрушающие методы контроля качества строительных материалов : текст лекций / Г. С. Семяняк, Б. Я. Трофимов. — Челябинск : ЧПИ, 1986. — 53 с.

11. ГОСТ 22690–2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. — Введ. 2016.04.01. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 23 с.

12. ГОСТ 17624–2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. — Введ. 2014.01.01. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 19 с.

13. Интерприбор. Продукция. Измерители прочности бетона. ОНИКС-1.СР [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.interpribor.ru/measuring-the-strength-by-the-method-of-cleavage-ribs-onyx-1-sr>. Загл. с экрана.

14. АтласИнвест. Измеритель прочности бетона ПОС-50. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.atlasmtr.com/index.pl?act=PRODUCT&id=118>. Загл. с экрана.

15. Интерприбор. Продукция. Измерители прочности бетона. ОНИКС-1.ОС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.interpribor.ru/measuring-the-strength-of-the-separation-with-shear-fracture-onyx-1-os>. Загл. с экрана.

16. Интерприбор. Продукция. Ультразвуковой контроль бетона. ПУЛЬСАР 2.1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.interpribor.ru/ultrasonic-measuring-instrument-of-concrete-durability-pulsar-2.1>. Загл. с экрана.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Определение реологических характеристик бетонной смеси и оценка их влияния на прочность бетона....	3
Практическое занятие к теме 1 .....	22
2. Ускоренный способ оценки качества цемента в бетоне и назначения состава бетона .....	26
Практическое занятие к теме 2 .....	34
3. Исследование режимов виброуплотнения бетонной смеси и их влияния на прочность бетона .....	40
Практическое занятие к теме 3 .....	46
4. Изучение факторов, влияющих на прочность сцепления бетона и арматуры.....	49
Практическое занятие к теме 4 .....	57
5. Изучение влияния пластифицирующей добавки на свойства бетонной смеси и тяжелого бетона .....	60
5.1. Физико-химические основы влияния ПАВ на процессы гидратации и твердения портландцементов .....	60
5.2. Эффективность действия добавок ПАВ .....	63

5.3. Определение состава бетона с химическими добавками .....	66
Практическое занятие к теме 5 .....	69
6. Исследование факторов, влияющих на ускорение твердения бетона в нормальных условиях .....	71
Практическое занятие к теме 6 .....	74
7. Определение прочности бетона неразрушающим методом.....	77
7.1 Механические методы .....	78
7.2. Акустические методы .....	84
7.3. Факторы, влияющие на скорость распространения звука в бетоне .....	85
7.4. Электромагнитные методы .....	88
7.5. Радиометрические методы .....	88
Практическое занятие к теме 7 .....	88
Библиографический список .....	91