ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
(ВНИИФТРИ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОНТРАКТОМЕТРАХ

МИ 1353—86

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1987

gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
(ВНИИФТРИ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОНТРАКТОМЕТРАХ

МИ 1353—86

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1987

РАЗРАБОТАНЫ Всесоюзным ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)

Директор **В. К. Коробов**
Исполнитель **А. И. Марков**

ПОДГОТОВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ Сектором государственных испытаний и стандартизации ВНИИФТРИ

Начальник сектора **О. А. Кюльян**
Исполнитель **Б. С. Генфон**

УТВЕРЖДЕНЫ ВНИИФТРИ 27 сентября 1985 г. (протокол № 12)

УДК 669.155.2:056.4

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ГСИ. Методика определения характеристик цементных материалов на дифференциальных контрактометрах

МИ 1353—86

Методические указания распространяются на цементные материалы типа бетон, раствор и цементный камень и устанавливают методы определения ряда характеристик их структурообразования, состава, прочности и режима твердения на основе измерения контракционного объема; метод подготовки контрактометра к измерениям с исключенной систематической погрешностью и методы обработки результатов измерений при определении характеристик с установленными пределами допускаемых значений средних квадратических отклонений случайной составляющей погрешности.

Область применения методических указаний — исследование и производство цементных материалов, неразрушающий контроль их свойств и его метрологическое обеспечение.

Методические указания не распространяются на цементные материалы, твердеющие при температуре свыше 100 °С и находящиеся в газообразующих или изменяющих содержание кислорода в воздухе средах.

1. ВИДЫ ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Величинами, подвергаемыми прямым измерениям во времени с помощью контрактометров, являются: разность давлений ΔP между герметизированными сосудами контрактометра, содержащими материал и его модель (разность давлений возникает в результате контракции материала) и температура T, при которой твердеет материал. Величинами, подвергаемыми прямым измерениям другими средствами измерений, являются: атмосферное давление P, объемы и масса материала и его компонентов.

Характеристики определяют косвенно по их зависимостям от величин, подвергаемых прямым измерениям с помощью контрактометров и других средств измерений. Эти зависимости приведены в разделе «Методы определения характеристик».

1.1. Характеристики структурообразования цементных материалов

Эти характеристики используют для оценки структуры материала, формирующейся в процессе его твердения. Их определяют во

© Издательство стандартов, 1987

времени, после завершения уплотнения смеси (бетонной, растворной, цементной) или погружения проб отвердевшего материала в воду. Начинают определение с момента герметизации сосудов контрактометра, наполненных материалом и его моделью.

1.1.1. Контракционный объем ΔV — разница между абсолютными объемами цементного материала с начала измерений и к требуемому моменту времени. Контракционный объем является прямым следствием химического и физико-химического взаимодействия вяжущего (цемента) с водой после их смешения. Контракционный объем возникает также при капиллярном поглощении воды отвердевшим материалом или его пористыми компонентами за счет защемления воздуха в капиллярах и переупаковки молекул воды, адсорбируемой новообразованиями. Контракцией от переупаковки молекул воды, адсорбируемой на поверхности заполнителей (крупного и мелкого) можно пренебречь, как вследствие ее малости, так и того, что она в основном проявляется до начала измерений (при перемешивании и уплотнении смесей).

1.1.2. Количество химически связанной воды в материале L — отношение массы химически связанной воды к исходной массе вяжущего (цемента).

1.1.3. Степень гидратации цемента β — отношение массы прогидратированной части цемента к его всей исходной массе или отношение количества химически связанной воды к ее предельному содержанию в материале (при полной гидратации вяжущего).

1.1.4. Общий объем пор материала V — суммарный объем пор, образовавшихся в результате затворения водой и вовлечения воздуха на стадии изготовления исходной смеси компонентов материала и накопления в материале гидратных новообразований с их собственными порами и контракционным объемом.

1.1.5. Объем капиллярных пор $V_к$ — объем пор в материале, способных наполняться водой только за счет капиллярных сил смачивания и поверхностного натяжения.

1.1.6. Объем пор $V_ф$ — объем открытых пор, наполняющихся водой гравитационно или не удерживающих воду под действием сил гравитации.

1.1.7. Объем пор сростка новообразований (пор «геля») $V'_н$ — объем пор, образовавшихся между частицами новообразований в их сростке.

1.1.8. Абсолютный объем новообразований $V_н$ — суммарный абсолютный объем всех гидратных новообразований, возникших в результате гидратации вяжущего (цемента).

1.2. Прочность цементных материалов

1.2.1. Прочность бетона (раствора) или цементного камня на одноосное сжатие $R_с$, растяжение $R_р$ и на растяжение при изгибе $R_{ри}$ — характеристики твердеющего бетона, устанавливаемые соответствующими испытаниями на разрушение образцов стандартных размеров. В методике регламентируется разовое испыта-

ние (к заданному времени) образцов-близнецов материала одного состава на принятых компонентах и последующий расчет (прогнозирование) изменения прочности материала в процессе твердения или в зависимости от изменения его состава. Расчет базируется на результатах разовых испытаний, сведениях о составе материала и его контракционном объеме.

1.2.2. Активность (марка) цемента $R_ц$ — прочность раствора в образцах, изготовленных по ГОСТ 310.4—81, к сроку 28 суток.

1.2.3. Активность цемента в бетоне $R_{цб}$ — прочность бетона одного состава, изготовленного на оцениваемом цементе и принятых компонентах. Водоцементное отношение бетона принимают равным 0,4. Режим твердения должен соответствовать производственному. Устанавливают значение $R_{цб}$ разовым испытанием после завершения режима твердения с одновременным определением к этому моменту соответствующего значения ΔV или L.

1.3. Характеристики состава цементных материалов

1.3.1. Водоцементное отношение W/C — отношение объема воды к массе цемента в цементном тесте уплотненной (бетонной, растворной или цементной) смеси. Из объема W должны быть исключены объемы воды, которая к моменту завершения уплотнения поглощается заполнителями, отслаивается на поверхности материала или отбирается вакуумированием и центрифугированием.

1.3.2. Оптимальное содержание химической добавки в смеси. D_0 — отношение массы добавки к массе вяжущего (цемента) в смеси, дающее наибольший эффект по назначению добавки при одновременном сохранении или повышении активности вяжущего.

1.3.3. Содержание вяжущего в материале C — масса вяжущего в единице объема твердеющего материала.

1.4. Характеристики режима твердения цементных материалов

1.4.1. Продолжительность твердения материала τ (часы, сутки) — время, в течение которого должна быть достигнута заданная прочность или любая другая характеристика материала.

1.4.2. Оптимальная продолжительность изотермической стадии тепловой обработки материала $\tau_{иопт}$ — время, к которому при заданных скорости подъема температуры и температуре изотермии степень гидратации вяжущего (цемента) достигает оптимального значения (относительный прирост контракционного объема за час не превышает 3 %).

1.4.3. Оптимальная температура изотермии $t_{иопт}$ — температура изотермической стадии тепловой обработки с заданной продолжительностью и скоростью подъема температуры, при которой достигается наибольшая степень гидратации вяжущего с учетом его эффективности при тепловой обработке.

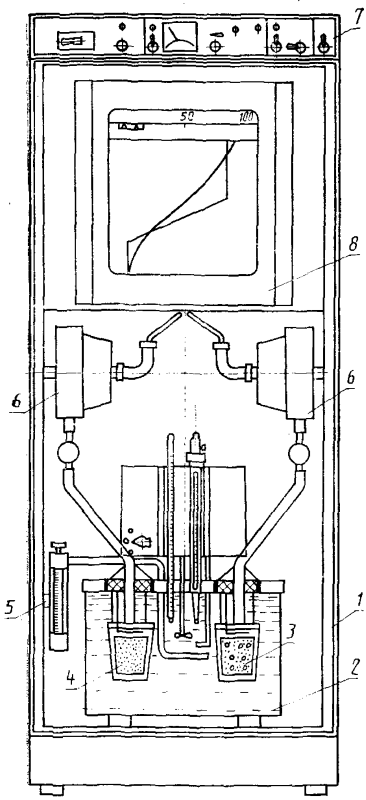
1.4.4. Оптимальная продолжительность $\tau_{нi}$ предварительной выдержки цементного материала перед тепловлажностной обработкой — время выдержки, в течение которого материал набирает прочность, достаточную для предотвращения его деструкции в начале тепловой обработки.

1.4.5. Оптимальная скорость подъема температуры материала, подвергаемого тепловой обработке $v_{тп}$ — скорость подъема температуры (°С/ч), при которой не происходит деструкция материала из-за теплового расширения воды и вовлеченного в смесь воздуха.

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ КОНТРАКТОМЕТРЫ

2.1. Для определения характеристик цементных материалов по данным об их контракции в процессе твердения применяют дифференциальные контрактометры как с U-образными дифференциальными манометрами (см. МИ 84—76), так и с индукционными преобразователями давления (см. п. 2.4.).

2.2. Дифференцирующим элементом контрактометра является емкость с модельной смесью, моделирующей цементный материал.



2.3. Модельная смесь предназначена для компенсации теплового расширения компонентов испытываемого материала, а также парциальных давлений воздуха и паров воды при изменении температуры. Она химически инертна. Состав (по компонентам) модельной смеси такой же, как и материала, за тем исключением, что в ней вяжущее (цемент) заменено по абсолютному объему кварцевым (промытым) песком. Абсолютный объем модельной смеси должен быть равным абсолютному объему пробы материала.

2.4. Дифференциальный контрактометр КД-02 с индукционным преобразователем давления (рис. 1) состоит из следующих основных блоков: стойки *1* для размещения всех функционирующих блоков; ультратермостата *2* для обеспечения заданной температуры среды в диапазоне 10—100 °С и размещения в среде испытываемого материала; герметизируемых сосудов со стаканами для испытываемого материала *3* и модельной смеси *4* (стаканы имеют собственные микронагреватели для синхронизации их температур); системы охлаждения ультратермостата с ротаметром *5*; индукционных преобразователей давления *6* типа МП, соединенных

вакуумными шлангами с сосудами, для измерения разности давлений между сосудами; самопишущего потенциометра *8* для непрерывной регистрации разности давлений $\Delta p = f(\tau)$ и температуры в термостате $t = f(\tau)$ во времени; блока управления *7* контрактометром, который посредством специальных плат связан с микронагревателями дифференциальными хромель-копелевыми термопарами, спаи которых находятся в сосудах, а также в термостате и в тепловой камере, где размещены образцы материала для физико-механических испытаний или изделия из бетона и железобетона.

2.5. Дифференциальный контрактометр КД-02 обеспечивает скорость подъема и снижения температуры от 5 до 50 °С/ч; имеет автономную связь с производственной или лабораторной тепловой камерой для задания или воспроизведения их заданного теплового режима (расстояние между прибором и камерой практически не ограничено). Погрешность поддержания температуры в термостате контрактометра не более $\pm 0{,}3$ °С, а погрешность синхронизации температуры между сосудами контрактометра не превышает $\pm 0{,}2$ °С. Погрешность измерения разности давлений Δp не превышает ± 133 Па.

2.6. Емкость стаканов контрактометра КД-02 позволяет проводить испытания цементного материала объемом до 500 см³. Максимальная мощность нагревателей термостата составляет 1000 Вт. Питание термостата и потенциометра осуществляют переменным напряжением 220 В. Чувствительность преобразователей давления к разности давлений Δp составляет 100 Па при разности давлений 0,01 МПа.

2.7. Важнейшей характеристикой дифференциального контрактометра является объем воздуха $V_в$ в системе «сосуд—шланг—преобразователь давления». Эта величина должна быть одинаковой для обеих систем (рабочей и модельной) и находиться в пределах 80—120 см³. Ее регулируют при предварительном наливе в сосуд воды, создающей над поверхностью смеси в стакане слой высотой 3—5 мм. Характеристику $V_в$ используют для расчета контракционного объема.

2.8. Второй важной характеристикой контрактометра является график его «собственного хода» — зависимость во времени разности давлений $\Delta p' = f(\tau)$ между сосудами со стаканами, наполненными только дистиллированной водой (допускается использование обычной питьевой воды) и подвергаемыми нагреву по заданному режиму при заданном значении $V_в$. Эту зависимость используют для исключения систематической погрешности при измерении Δp, вызванной контракцией. Погрешность исключают вычитанием ординат графика (с учетом их знака) из кривой кинетики Δp.

Величины $V_в$ и $\Delta p'$ — являются паспортными характеристиками, устанавливаемыми заранее.

3. ПОДГОТОВКА КОНТРАКТОМЕТРА КД-02 К ИЗМЕРЕНИЯМ

3.1. К измерениям допускается контрактометр, прошедший с положительными результатами поверку, заключающуюся в поэле-

ментной поверке его комплектующих стандартных узлов (самопишущего потенциометра, преобразователей давления блока усилителей, термометров, термопар и т. д.) и в воспроизведении графика «собственного хода» прибора (см. п. 2.8).

3.2. Контрактометр подготавливается к измерениям согласно настоящим методическим указаниям и согласно указаниям эксплуатационной документации на него.

3.3. Установка должна быть подключена к электросети 220 В и водоснабжению. При этом посредством пускателя, тумблеров и выключателей проверяют наличие электропитания на входе электрических и электронных приборов и их готовность к функционированию. Все приборы должны находиться в состоянии прогрева не менее 0,5 ч до начала измерений.

3.4. В течение времени, отведенного на прогрев приборов, осуществляют подготовку сосудов контрактометра к испытаниям и измерениям. При этом должны быть открыты вентили преобразователей давления и крышки сосудов. Так как модельная смесь должна быть физически и химически инертной, то к началу опыта она уже должна находиться в подготовленном состоянии. Для этого стакан с модельной смесью, помещенный в сосуд, заранее подвергают в термостате тепловой обработке при температуре 80 °С не менее 5 ч, а затем охлаждению до нормальной температуры (до 20 °С). В сосуд с модельной смесью должна быть налита дополнительно вода в количестве 20—50 мл, отвечающем паспортному значению $V_в$.

3.5. После открытия крышек из сосуда для цементного материала извлекают стакан и покрывают его внутреннюю поверхность смазкой, предотвращающей ее сцепление с твердеющим материалом. Этот стакан наполнят смесью испытываемого материала, взятой из приготовленного замеса и подвергают вибрации, обеспечивая заданную степень уплотнения смеси. Избыток смеси в стакане, если она жесткая, срезают и заглаживают ее поверхность на уровне торцов стакана.

3.6. Стакан с уплотненной смесью помещают в сосуд с предварительно налитой водой в количестве 20—50 мл (по паспорту). Затем этот сосуд и сосуд с модельной смесью закрывают герметизирующими крышками и опускают их в термостат, после чего включают перемешивание воды в термостате.

3.7. При использовании высокоэкзотермического вяжущего или цемента и воды затворения с повышенной температурой или смеси цементного материала либо охлажденной, либо подогретой, сосуд с модельной смесью подвергают в термостате предварительному нагреву (охлаждению) до температуры испытываемого материала и поддерживают ее в термостате контактным термометром до помещения в него сосуда с материалом.

3.8. Окончательную герметизацию сосудов обеспечивают закрытием обоих вентилей преобразователей давления, которое осуществляют после автоматического выравнивания микронагревателями температуры в сосудах (по световому сигналу через 2—3 мин).

3.9. После окончательной герметизации сосудов обеспечивают в термостате заданный режим твердения материала. Если этот режим осуществляется не автономно, а должен воспроизводить режим камеры с образцами или изделиями, то один из спаев дифференциальной термопары размещают в наиболее характерной точке камеры или самого изделия (образца).

Заданный режим автономно осуществляют следующим образом. Устанавливают контактным термометром заданный уровень температуры выдержки, включают ротаметр и нагреватели термостата. После завершения выдержки отключают ротаметр, выставляют контактный термометр на заданную температуру изотермии, а регулятор мощности нагревателей выставляют на заданную скорость нагрева. После завершения изотермии приступают к охлаждению. Для этого контактный термометр выставляют на температуру 20 °С и включают ротаметр на заданную скорость охлаждения. При воспроизведении режима камеры роль контактного термометра автоматически выполняет специальный блок регулирования.

4. ИЗМЕРЕНИЕ КИНЕТИКИ КОНТРАКЦИИ ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

4.1. Кинетику контракции цементного материала измеряют в процессе его твердения косвенно на основе прямых измерений разности давлений Δp_i между сосудами с материалом и его моделью при температуре t_i, соответствующей режиму твердения. Результаты измерения Δp_i и t_i автоматически и совместно регистрируются во времени самопишущим потенциометром на ленте в виде графиков. Измерения начинают с момента герметизации сосудов.

4.2. Косвенное измерение кинетики контракции состоит в определении во времени контракционного объема ΔV_i по зависимости:

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta p_i V_в}{p\frac{T_i}{T_0} - \Delta p_i}, \qquad (1)$$

где $V_в$ — объем воздуха в системе (см. п. 2.7), см³;

Δp_i — разность давлений между сосудами за вычетом соответствующей ординаты $\Delta p'$ графика «собственного хода» ($\Delta p = \Delta p_i - \Delta p'$), см вод. ст.;

p — атмосферное давление в момент герметизации сосудов, см вод. ст.;

T_0, T_i — температура в термостате по Кельвину соответственно в момент герметизации сосудов и измерения Δp_i ($T_i = 273 + t_i$), К.

Примечание. Формула (1) применяется при использовании контрактометра КД-02. При использовании контрактометра с U-образным дифманометром применяется формула, приведенная в МИ 84—76.

4.3. При измерениях Δp_i и p с погрешностью не более $\pm 0{,}5$ см вод. ст., температуры с погрешностью $\pm 0{,}3$ °С и обеспечении объема материала и характеристик $V_в$ с погрешностью

± 1 см^3, погрешность определения ΔV_i (ее среднее квадратическое отклонение) при $\Delta V_{i\max}$ не превышает $\pm 0{,}1$ см^3, т. е. $S\Delta\overline{V} = 0{,}1$ см^3.

5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

Методы регламентируют определенную последовательность операций и приемов, а также вычисления характеристик по формулам и справочным таблицам. В компьютерном варианте дифференциального контрактометра операции вычисления и обработку осуществляют микро ЭВМ. В каждой отдельной методике приведены допускаемые значения средних квадратических отклонений случайной составляющей погрешности и условия, при которых они выполняются.

5.1. Определение характеристик структурообразования цементных материалов

5.1.1. Прогнозирование контракционного объема ΔV_i в материале к различным срокам нормального твердения.

5.1.1.1. При твердении материала в нормальных условиях (при температуре (20 ± 1)°С и относительной влажности воздуха 100 % определяют начало периода кристаллизационного твердения — время $\tau_к$, к которому в материале образуется непрерывная сетка кристаллизационных контактов срастания между частицами гидратных новообразований.

Для этого на кривой кинетики контракционной разности давлений Δp_i, начиная с 24-го часа твердения (для глиноземистых цементов и БТЦ с 12 часов), находят минимум второй производной $\Delta p''$, используя следующую зависимость:

$$\Delta p''_i = \Delta p_1 - 2\Delta p_2 + \Delta p_3, \qquad (2)$$

где значения Δp_1, Δp_2, Δp_3 берут на кривой с интервалом в три часа. Каждый последующий расчет $\Delta p''_i$ производят, смещаясь на этот интервал по кривой кинетики в сторону увеличения времени. За начало стадии кристаллизационного твердения материала принимают время $\tau_к$, при котором значение $\Delta p''_i$ будет наименьшим.

5.1.1.2. Измерения кинетики контракции завершают по истечении времени $\tau_1 = \tau_к + 2$ сут.

5.1.1.3. Определяют показатель порядка кривой кинетики контракции m по зависимости:

$$m = \frac{\lg \Delta p_1 - \lg \Delta p_к}{\lg \tau_1 - \lg \tau_к}, \qquad (3)$$

где $\tau_к$ — время, с которого начинается линейная логарифмическая зависимость, (сут, ч); τ_1 — время, к которому завершаются измерения (см. п. 5.1.1.2); $\Delta p_к$, Δp_1 — разности давлений, соответствующие времени $\tau_к$ и τ_1.

Примечание. Значения логарифмов чисел приведены в табл. 1 приложения 1.

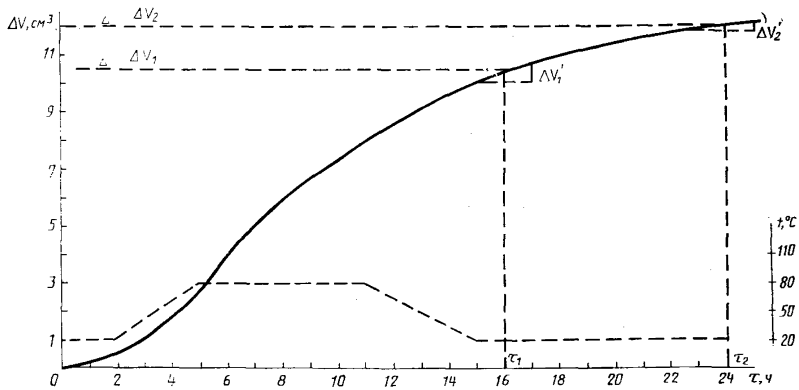
5.1.1.4. Прогнозируемое значение контракционного объема к требуемому времени τ_i определяют по формуле

$$\Delta V_i = \Delta V_к \left(\frac{\tau_i}{\tau_к}\right)^m \qquad \text{при } \tau_i > \tau_к, \tag{4}$$

где значение $(\tau_i/\tau_к)^m$ находят по табл. 2 приложения 1. С учетом условий п. 4.3, а также приближенности формулы (3) погрешность прогнозирования при $\Delta V_{i\max}$, $S\overline{\Delta V} = \pm 0{,}5$ см^3.

5.1.1.5. При твердении материала вначале по заданному тепловому режиму, а после его окончания в нормальных условиях, продолжают измерять ΔV в течение 10-часовой выдержки после завершения теплового режима, в том числе и охлаждения. В течение этого времени в термостате поддерживают температуру, равную 20 °С.

5.1.1.6. К первому и девятому часам этого дополнительного твердения фиксируют значения соответственно Δp_1, ΔV_1 и Δp_2, ΔV_2, а также τ_1, τ_2 (отсчитывают время с начала твердения). Измеряют приращения контракционного объема $\Delta V_1'$ и $\Delta V_2'$ (рис. 2) за 2 ч, отсчитываемые соответственно от τ_1 — 1 ч до τ_1+1 ч и от τ_2—1 ч до τ_2+1 ч и определяют показатель степени m по формуле:



$$m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{2\left(\dfrac{\Delta V_2}{\Delta V_2'} - \dfrac{\Delta V_1}{\Delta V_1'}\right)}, \tag{5}$$

где $\tau_2 - \tau_1 = 8$ ч, поэтому $m = \dfrac{4}{\dfrac{\Delta V_2}{\Delta V_2'} - \dfrac{\Delta V_1}{\Delta V_1'}}$

или

$$m = \frac{4}{\dfrac{\Delta p_2}{\Delta p_2'} - \dfrac{\Delta p_1}{\Delta p_1'}}. \tag{6}$$

5.1.1.7. Определяют сдвиг продолжительности твердения, т. е. на сколько продолжительность твердения материала в нормальных условиях больше продолжительности принятого теплового режима при достижении одного и того же уровня контракции ΔV_1:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_2 - \tau_1 \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}\right)^{\frac{1}{m}}}{\left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}\right)^{\frac{1}{m}} - 1}; \qquad (7)$$

или

$$\Delta\tau = \frac{\tau_2 - \tau_1 \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{\frac{1}{m}}}{\left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{\frac{1}{m}} - 1}. \qquad (8)$$

Здесь значение $(\Delta V_2/\Delta V_1)^{\frac{1}{m}}$ находят по табл. 3 приложения 1.

5.1.1.8. Прогнозируют значение контракционного объема ΔV_i к требуемому времени τ_i нормального твердения после тепловой обработки:

$$\Delta V = \Delta V_1 \left(\frac{\tau_1 + \Delta\tau}{\tau_1 + \Delta\tau}\right)^m. \qquad (9)$$

5.1.1.9. Осуществляя опыт по п. 5.1.1.4, ускоренно прогнозируют контракционный объем ΔV_i материала, который должен твердеть с самого начала в нормальных условиях:

$$\Delta V_i = \Delta V_1 \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 + \Delta\tau}\right)^m. \qquad (10)$$

При этом τ_i должно быть не менее трех суток для алитовых, белитовых цементов и ШПЦ, а для алюминатных цементов, БТЦ и ОБТЦ — не менее одних суток.

5.1.1.10. Для прогнозирования кинетики контракционного объема материалов при изменении его водоцементного отношения используют данные о ΔV_i, m, полученные согласно пп. 5.1.1.1—5.1.1.5 для одного состава (одного водоцементного отношения), корректируют их в соответствии с табл. 4 приложения 1 и производят расчеты по формулам (9) и (10). Если при этом изменяется и содержание цемента в материалах, то скорректированное значение ΔV_1 изменяют пропорционально этому содержанию.

5.1.2. *Количество химически связанной воды* L_i в материале определяют по формуле

$$L_i = \frac{\Delta V_i}{C \cdot K_1}, \qquad (11)$$

где ΔV_i — контракционный объем (измеренный или запрогнозированный), см^3; C — масса цемента в испытываемом объеме материала, г; K_1 — константа контракции, характерная для каждого типа цемента и зависящая от его минералогического состава, вида

химической добавки и температуры твердения (если $t>100$ °С), см³/г. Данную константу, при температуре $t\leqslant 100$ °С, находят из табл. 1 приложения 2.

Относительная погрешность $S\overline{L}_i/\overline{L}_i$ определения L_i при измеренных и запрогнозированных значениях ΔV_i не превышает соответственно 0,02 и 0,05.

Примечание. В каждом частном случае, когда требуется особо точная оценка L_i, когда применяемые химические добавки изменяют традиционный фазовый состав новообразований, или когда вяжущие по минералогическому составу не относятся к основным типам цемента (табл. 1 приложения 2), значения K_1 устанавливают по простой методике. Для этого к сроку не менее 2 сут (нормальное твердение) или после тепловой обработки измеряют ΔV_i цементного камня или раствора, отбирают из него пробу массой 5 г и традиционным методом «сушкой—прокаливанием», определяют соответствующее значение L_i как отношение $L_i=(m_{ic}-m_{in})/m_{in}$, где m_{ic}, m_{in} — масса пробы соответственно после высушивания и прокаливания.

Затем определяют константу K_1 по формуле

$$K_1=\frac{\Delta V_i}{L_{ic}}. \qquad (12)$$

5.1.3. Степень гидратации цемента β определяют по формулам

$$\beta_i=\frac{L_i}{L'} \qquad (13)$$

или

$$\beta_i=\frac{\Delta V_i}{L'KC}, \qquad (14)$$

где L' — предельное содержание химически связанной воды в цементном камне (при полной гидратации цемента). Данная характеристика является отношением суммарной массы химически связанной воды в новообразованиях к суммарной массе минералов цемента, пошедших на их образование. Для основных типов цементов, приведенных в табл. 1 приложения 2, значение L' принимают равным 0,4, если температура твердения $t\leqslant 100$ °С (при $t>100$ °С значение L' уменьшается с увеличением температуры и находится в диапазоне $0{,}2\leqslant L'\leqslant 0{,}4$).

При $t\leqslant 100$ °С:

$$\beta_i=\frac{\Delta V_i}{K_2C}, \qquad (15)$$

где $K_2=L'K_1$ находят по табл. 1 приложения 2.

5.1.4. Объем пор материала V_i определяют по формуле

$$V_i=V_m(1-K_y)+W-K_3\Delta V_i, \qquad (16)$$

где V_m — объем цементного материала, см³; K_y — коэффициент уплотнения смеси цементного материала; W — объем воды затворения смеси за вычетом объемов воды, поглощенной заполнителями, отслоившейся в результате седиментации, центрифугиро-

вания или вакуумирования, см³; $K_3=\frac{1-K_1\gamma_W}{K_1\gamma_W}$ — константа контракции; γ_W — плотность воды в свободном состоянии при заданной температуре; значения K_3 для основных типов цементов приведены в табл. 1 приложения 2.

5.1.5. Объем новообразований $V_{нi}$ в материале определяют по формуле

$$V_{нi}=K_4\cdot\Delta V_i, \qquad (17)$$

где $K_4=\frac{\gamma_W+L'\gamma_c-K_1\gamma_c\gamma_W L'}{K_1L'\gamma_c\gamma_W}$ — константа контракции; (18)

γ_c — плотность вяжущего (цемента), г/см³; значение K_4 находят по табл. 1 приложения 2.

5.1.6. Объем пор сростка новообразований (пор «геля») $V_{нi}$ определяют по формуле:

$$V_{нi}=0{,}39V_{нi}. \qquad (19)$$

5.1.7. Объем капиллярных пор $V_{кi}$ в цементном материале, наполняющихся водой в течение заданного времени, определяют на основе измерений кинетики физической контракции — контракции от сжатия воздуха в капиллярах, наполняющихся водой за счет их смачивания и поверхностного натяжения.

5.1.7.1. Отбирают от отвердевшего цементного материала пробу объемом 300—400 см³, раскалывают ее на куски ориентировочным объемом 20 см³ или, в случае щебеночного бетона, линейными размерами, в 2—3 раза большими максимальных размеров зерен крупного заполнителя.

5.1.7.2. Пробу в кусках высушивают до постоянной массы при температуре + (102±1) °С, охлаждают до температуры + (20±1) °С и помещают в один из сосудов контрактометра, сохраняя во втором модель цементного материала. Сосуд с образцами материала наполняют водой, обеспечивая для обоих сосудов равенство объемов воздуха $V_в$ и без промедления герметизируют. Сосуды помещают в термостат контрактометра, включают перемешивание в нем воды, системы охлаждения и регулирования температуры, а также выставляют контактный термометр на температуру +20 °С. Измерения разности давлений и времени начинают с момента герметизации сосудов.

5.1.7.3. Определяют к 48 часам или к требуемому моменту времени τ_i объем $V_{кi}=\Delta V_i$ по формуле 1, приняв в ней равенство $T_i/T_0=1$.

Погрешность $S\overline{V}_{кi}$ определения объема капиллярных пор не превышает 1 см³.

5.1.8. Объем пор $V_{фi}$, наполняющихся водой гравитационно, определяют после извлечения из сосуда (см. п. 5.1.7) пробы материала по истечении опыта на определение $V_{кi}$.

5.1.8.1. Определяют суммарную массу насыщенных водой кусков пробы, вычитают из нее массу пробы в высушенном состоянии,

делят эту разность на плотность воды в свободном состоянии, т. е. определяют вначале объем всей воды $V_{фкi}$, поглощенной материалом за время τ_i или 48 ч.

Объем $V_{фi}$ находят по формуле

$$V_{фi}=V_{фкi}-V_{кi}. \qquad (20)$$

Погрешность $S\overline{V}_{фi}$ определения $V_{фi}$ не превышает 1,5 см³.

Примечание. Для определения характеристик структурообразования цементных материалов с пористыми заполнителями, за исключением характеристик, определяемых по пп. 5.1.7 и 5.1.8, приготовляют смеси, в которых пористые заполнители заменяют по их объемному содержанию на плотные. Из объема воды для затворения таких смесей вычитают объем воды, который поглощают пористые заполнители, находясь в смеси от начала ее затворения и до завершения уплотнения. Вычитаемый объем воды устанавливают предварительно по общеизвестным методикам.

5.2. Определение и прогнозирование прочности цементных материалов в процессе их твердения

5.2.1. Определение прочности бетона (раствора) или цементного камня на одноосное сжатие R_c, растяжение R_p и на растяжение при изгибе $R_{ри}$ проводят непосредственно в процессе твердения материала при изменении его состава, а также при прогнозировании прочности во времени и в зависимости от режима твердения.

5.2.1.1. При определении прочности на одноосное сжатие готовят из принятых компонентов замес материала объемом 3 л. При определении прочности на растяжение (осевое или при изгибе) объем замеса должен быть достаточным для изготовления двух образцов, применяемых при испытаниях, и наполнения одного стакана контрактометра.

Водоцементное отношение принимают равным 0,4.

Применяют, если это регламентировано технологией, химическую добавку принятой дозировки и обеспечивают необходимую подвижность (жесткость) смеси.

Для материала на другом виде вяжущего готовят новый (другой) замес аналогичного объема. Относительная погрешность дозирования компонентов смеси во всех случаях не должна превышать 1 %.

5.2.1.2. Из замеса формуют по принятой технологии два образца, например в форме куба размерами 100×100×100 мм, или другой формы, которые затем помещают в камеру твердения. Остаток замеса уплотняют в одном из стаканов дифференциального контрактометра, который затем герметизируют и помещают в эту установку.

В обоих случаях формования обеспечивают и фиксируют одинаковую степень уплотнения смеси, т. е. одинаковый относительный объем вовлеченного и невытесненного воздуха.

Примечания:

1. Если формование смеси осуществляют без пригруза и обеспечивают ее оптимальную степень, то завершают формование не после появления и полного растекания цементного молока по открытой поверхности, а после прекращения интенсивного выделения из смеси пузырьков воздуха.

2. Если формование осуществляют с обеспечением наперед заданного коэффициента уплотнения смеси, то формование завершают после истечения времени, соответствующего объему принятых форм образцов и обеспечивающего достижение требуемой степени уплотнения в них бетонной смеси. Эти критерии являются важнейшим условием одинаковости уплотнения смесей в емкостях различного объема и формы, а следовательно и уменьшения как масштабного фактора прочности материала, так и разброса результатов испытаний образцов бетона на прессе.

5.2.1.3. Измеряют кинетику контракции материала при принятом или оптимальном режиме (во времени и температуре) твердения. Контрактометр с помощью блока управления и второй дифференциальной термопары (см. пп. 2.4, 3.9) обеспечивает режим твердения, идентичный тому, которому подвергают бетон в образцах-кубах или изделиях.

5.2.1.4. После завершения режима тепловой обработки и охлаждения бетона в образцах и сосуде до температуры (20 ± 1) °С или к срокам, указанным в п. 5.1.1.1, если твердение материала происходит в нормальных условиях, фиксируют значение Δp_0, определяют ΔV_0 по формуле (1) и прямыми испытаниями двух образцов определяют базовый предел прочности R_0 на одноосное сжатие или растяжение или растяжение при изгибе.

5.2.1.5. Предел прочности материала R_i к требуемому сроку при твердении по осуществленному или любому другому режиму и при прогнозировании во времени, если не изменяется вид применяемых вяжущего и химической добавки, определяют по формуле

$$R_i = R_0 \left[\frac{\Delta V_i C_0 \left(\frac{W_0+V_0}{C_0} + \frac{\Delta V_0}{K_2 C_0 \gamma_c} \right)}{\Delta V_0 C_i \left(\frac{W_i+V_i}{C_i} + \frac{\Delta V_i}{K_2 C_i \gamma_c} \right)} \right]^{\alpha}, \qquad (21)$$

где индексы i и 0 означают принадлежность характеристик к материалам с пределами прочности соответственно R_i и R_0; ΔV_i — контракционный объем, который определяют или прогнозируют согласно п. 4 и 5.1; W — объем воды затворения за вычетом ее объемов, отделившихся при седиментации, вакуумировании, центрифугировании и других воздействиях, а также поглощенных пористыми заполнителями к моменту завершения формования смеси, см^3; V — объем воздуха (вовлеченного или невытесненного) в отформованной смеси (объем воздуха в пористых заполнителях не учитывается), см^3; C — масса вяжущего в смеси, г;

Примечание. Величины W, V, C и ΔV характеризуют объем материала, находящегося в стакане контрактометра.

K_2 — константа контракции, зависящая от минералогического состава вяжущего (удельная контракция), см^3/г числовое значение которой принимают равным 0,12; 0,11; 0,1 и 0,09 для цементов соот-

ветственно: алюминатного, алюминатно-алитового и БТЦ; обычного алитового; белитового, пуццоланового и ШПЦ; α — показатель степени, который принимают равным 3/2 — при одноосном сжатии и 1 — при одноосном растяжении или растяжении при изгибе (значения чисел, возведенных в степень 3/2, приведены в табл. 1 приложения 3).

Примечания:

1. Определение пределов прочности по формуле (21) становится достоверным с начала периода кристаллизационного твердения, т. е. начиная с момента перехода коагуляционно-кристаллизационного периода формирования структуры в кристаллизационный, когда стабилизируется присущая конкретному материалу природа сил сцепления, ответственных за его прочность. Методика установления времени $\tau_к$ начала указанного периода при твердении материала в нормальных условиях приведена выше (см. п. 5.1.1.1). При тепловлажностном режиме твердения время $\tau_к$ устанавливают по этой же методике, начиная производить расчеты по формуле (2) с первого часа изотермической стадии при температуре изотермии $t_и > 70$ °С. В данном случае как интервалы между точками отсчета значений ΔP, ΔP_2 и ΔP_3, так и смещение во времени по кривой кинетики (для последующих расчетов $\Delta P_i''$) должны составлять 0,5 ч. При температуре изотермии $40 \leqslant t_и \leqslant 70$ °С указанные интервалы и смещение принимают равными одному часу, а расчеты по формуле 2 начинают со второго, третьего, четвертого и пятого часов для температуры изотермии соответственно 70, 60, 50 и 40 °С.

2. Формула (21) приемлема для определения R_t материалов на пористых заполнителях при условии сохранения линейной зависимости между прочностью материалов и прочностью их растворной части, что в подавляющем большинстве случаев имеет место на практике.

Относительная погрешность $S\bar{R}_i / \bar{R}_i$ определения R_t, когда используют измеренное значение контракционного объема, не превышает 0,07, а при использовании прогнозируемых значений не превышает 0,12.

5.2.2. Ускоренное определение активности (марки) цемента осуществляют двумя способами на основе контрактометрических и прочностных данных о твердении стандартной (по ГОСТ 310.4—81) смеси в нормальных условиях или при ее тепловлажностной обработке.

5.2.2.1. Для обоих способов готовят замес стандартной цементно-песчаной смеси (по ГОСТ 310.4—81) объемом 1 л. Из замеса формуют два образца — балочки размером 40×40×160 мм, а оставшуюся его часть уплотняют в сосуде контрактометра.

Формование смеси осуществляют в соответствии с примечанием к п. 5.2.1.2.

5.2.2.2. Осуществляют твердение материала либо при тепловой обработке по режиму «2 часа — выдержка при $t = 20$ °С, 3 часа — подъем температуры до 90 °С, 3 часа — изотермия при $t = 90$ °С, 3 часа — охлаждение до 20 °С и 10 часов твердения при этой температуре»; либо в нормальных условиях. Образцы-балочки испытывают на прочность по ГОСТ 310.4—81 к моменту $\tau_к$ согласно п. 5.1.1.1 и к τ_1 (при тепловой обработке) согласно п. 5.1.1.6, т. е. определяют $R_к$ или R_1.

Прогнозируют значение контракционного объема к сроку 28 сут по формулам (4) или (10), предварительно найдя значение показателя степени m.

5.2.2.3. Определяют активность цемента $R_ц$ по формуле (21), где принимают: $R_i = R_ц$; $\Delta V_i = \Delta V_{28}$; $\Delta V_0 = \Delta V_к$ или $\Delta V_0 = \Delta V_1$; $R_0 = R_к$ или $R_0 = R_1$. Относительная погрешность определения $R_ц$ ускоренным способом $S\overline{R}_ц/\overline{R}_ц$ не превышает 0,12.

5.2.3. Определение активности цемента в бетоне $R_{цб}$ осуществляют ускоренно по тепловому режиму, принятому в производстве с дополнениями в соответствии с п. 5.1.1.4.

5.2.3.1. Приготавливают на принятых вяжущем и компонентах при $W/C = 0{,}4$ бетонную смесь объемом, достаточным для формования двух образцов-кубов размером $100 \times 100 \times 100$ мм и наполнения одного стакана контрактометра. Уплотняют смесь в формах образцов и стакане в соответствии с рекомендациями п. 5.2.1.2.

5.2.3.2. Осуществляют твердение бетона в образцах и стакане контрактометра по принятому режиму, определяют $R_{цб}$, как и $R_1 = R_0$ для цементно-песчаного раствора, в соответствии с п. 5.2.2.2 и п. 5.2.2.3, а также определяют контракционный объем ΔV_1 к моменту времени τ_1 и прогнозируют к сроку 28 суток значение ΔV_{28}.

5.2.3.3. Величины $R_{цб}$, ΔV_1 и ΔV_{28} используют при определении составов бетона на принятых компонентах для расчета водоцементных отношений, обеспечивающих требуемую прочность соответственно после завершения тепловой обработки по любому режиму и к различным срокам нормального твердения, в том числе после теплового режима.

Относительная погрешность $S\overline{R}_{цб}/\overline{R}_{цб}$ определения активности цемента в бетоне не превышает 0,07.

5.3. Определение некоторых характеристик состава цементных материалов

5.3.1. Определение водоцементного отношения W_i/C_i, обеспечивающего к требуемому моменту времени заданную прочность цементного материала. Данную методику используют при постоянстве вида принятых компонентов и технологии изготовления цементного материала. Если хотя бы один из его компонентов изменяют, то определение W_i/C_i повторяют.

Методика реализуется на основе данных определения $R_{цб}$ или $R_{бо}$ и соответствующих значений ΔV_1, ΔV_0, а также расчетов по формулам (22)—(24).

5.3.1.1. Принимают для расчетов следующие данные: полученные согласно п. 5.2.1.4 или 5.2.3.2 значения базовой прочности R_0 или $R_{цб}$ и соответственно ΔV_0 или ΔV_1, обозначив при этом для удобства базовую прочность через R_0; наперед заданное значение R_i и соответствующее ему значение ΔV_i, запрогнозированное согласно п. 5.1.1.4 или п. 5.1.1.9, к моменту времени, когда должна быть достигнута заданная прочность (так как расход цемента

C_i заранее неизвестен, то R_i прогнозируют для расхода цемента C_0, отвечающего прочности R_0); данные о требуемой или обеспечиваемой степени уплотнения цементной смеси, т. е. об объеме воздуха (V_0; V_i), сохраняющегося в смеси после ее уплотнения.

5.3.1.2. Определяют водоцементное отношение W_i/C_i для объема бетона, равного объему стакана контрактометра, как отношение W_i/C_0 по формулам:

в общем виде

$$\frac{W_i}{C_i}=\frac{\Delta V_i C_0\left(\frac{W_0+V_0}{C_0}+\frac{\Delta V_0}{C_0 K_2 \gamma_c}\right)}{\Delta V_0 C_i (R_i/R_0)^{2/3}}-\frac{V_i}{C_i}-\frac{\Delta V_i}{C_i K_2 \gamma_c}; \qquad (22)$$

в упрощенном виде, когда $V_i = V_0$, $K_y \geqslant 0{,}98$;

$$\frac{W_i}{C_i}=\frac{\Delta V_i C_0\left(\frac{W_0}{C_0}+\frac{\Delta V_0}{C_0 K_2 \gamma_c}\right)}{\Delta V_0 C_i (R_i/R_0)^{2/3}}-\frac{\Delta V_i}{C_i K_2 \gamma_c}. \qquad (23)$$

При одинаковых по длительности и температуре режимах ТВО принимают $\Delta V_i = \frac{\Delta V_0 C_i}{C_0}$ и используют формулу

$$\frac{W_i}{C_i}=\frac{\frac{W_0}{C_0}+\frac{\Delta V_0}{C_0 K_2 \gamma_c}}{(R_i/R_0)^{2/3}}-\frac{\Delta V_0}{C_0 K_2 \gamma_c}. \qquad (24)$$

Примечания:

1. Формула (24) наиболее приемлема в условиях производства, когда режим тепловой обработки принят одинаковым для всех составов.

2. Расчетами по формулам (22—24) пользуются не только при определении состава материала, но и для корректировки W_i/C_i, если при контроле твердения материала обнаруживают отклонения ΔV_i, ΔV_0, R_0, R_i, что может быть вызвано изменением активности вяжущего состояния и вида заполнителей, изменениями теплового режима. Значение W_i/C_i корректируют и при изменении степени уплотнения смеси или влажности заполнителей.

3. Показатель степени $1/\alpha$ принимают равным: 2/3 — для одноосного сжатия и 1 — для одноосного растяжения и растяжения при изгибе. Значения чисел, возведенных в степень 2/3, даны в табл. 2 приложения 3.

Относительная погрешность $S\overline{W}_i / \overline{C}_i / \overline{W}_i/C_i$ определения водоцементного отношения W_i/C_i при использовании формул (22) (23) и (24) не превышает соответственно 0,03; 0,04 и 0,06.

5.3.2. Выбор цемента, обеспечивающего наибольшее адгезионно-когезионное сцепление в бетоне и наибольшую прочность бетона при одинаковой степени гидратации цемента.

5.3.2.1. На принятых заполнителях определяют активность в бетоне каждого из сопоставляемых цементов $R_{цб}$ (см. п. 5.2.3).

5.3.2.1. Вычисляют для каждого из цементов удельную прочность (активность в бетоне, отнесенную к концентрации в нем новообразований):

$$R'=\frac{R_{цб}}{\left(\frac{4{,}3}{1-\frac{0{,}5CK_1}{\Delta V_1}}\right)^{3/2}}. \qquad (25)$$

5.3.2.2. Выбор цемента осуществляют по наибольшему из сопоставляемых значений R'.

5.3.3. Выбор цемента по наибольшей эффективности (гидратационной активности) при тепловой обработке.

5.3.3.1. Одновременно с определением активности в бетоне каждого из сопоставляемых цементов прогнозируют для них ΔV_{28} и вычисляют соотношение $\Delta V_1/\Delta V_{28}$.

5.3.3.2. Выбор цемента осуществляют по наибольшему из сопоставляемых соотношений $\Delta V_1/\Delta V_{28}$.

5.3.4. Выбор вида заполнителей, обеспечивающих наибольшую прочность бетона на принятых цементах, осуществляют аналогично п. 5.3.2 по критерию (25). В этом критерии $R_{цб}$ — активность одного и того же цемента в бетоне на сопоставляемых заполнителях.

5.3.5. Установление оптимального содержания химической добавки в цементной (бетонной) смеси по условию сохранения или повышения активности цемента в бетоне.

5.3.5.1. Определяют активность цемента в бетоне без добавки и с добавкой в количестве D_1 (в долях от массы цемента) — наименьшем, среднем и наибольшем из рекомендуемых при ее применении по назначению.

5.3.5.2. Вычисляют значения R_1 (см. п. 5.3.2.1) для установленных $R_{цб}$. Строят график зависимости R' от введенного в смесь количества добавки.

5.3.5.3. За оптимальное содержание добавки D_0 принимают по графику то ее содержание, при котором не нарушается значение R', установленное для бетона без добавки.

5.3.5.4. Если введение добавки, например пластифицирующей, приводит к снижению водоцементного отношения, обеспечивая при этом ту же пластичность смеси, то при этом определяют активность цемента в бетоне с различными дозировками добавки, но при измененных значениях водоцементного отношения. Строят график согласно п. 5.3.5.2.

5.3.5.5. За оптимальное содержание добавки принимают то, при котором выполняется условие

$$\frac{R_{цбд}}{\left(\dfrac{4{,}3}{1+\dfrac{(W/c)_д \cdot 1{,}2CK}{\Delta V_1}}\right)} = \frac{R_{цб}}{\left(\dfrac{4{,}3}{1+\dfrac{0{,}5CK_1}{\Delta V_1}}\right)^{3/2}}. \qquad (26)$$

Здесь правая часть равенства является удельной прочностью бетона на цементе без добавки, а $R_{цбд}$ и $(W/C)_д$ — соответственно активность цемента и водоцементное отношение в бетоне с оптимальным содержанием добавки.

5.4. Определение характеристик режима твердения цементных материалов

5.4.1. Определение оптимальной продолжительности $\tau_{нi}$ предварительной выдержки цементного материала перед тепловлажностной обработкой (ТВО).

5.4.1.1. Изготавливают дополнительно два образца-куба («восьмерки») из замеса для базового бетона (бетона с прочностью согласно п. 5.2.1.4), которые одновременно с образцами, изготовленными по п. 5.2.1.2, подвергают принятой выдержке и режиму ТВО.

5.4.1.2. При достижении на стадии подъема температуры 70 °С оба образца извлекают из камеры твердения и испытывают для определения прочности $R_{\text{ро}}$. При этой температуре фиксируют соответствующее значение ΔV_0. Если испытывают образцы-кубы, то $R_{\text{ро}}$ определяют по формуле

$$R_{\text{ро}}=0{,}22R_{\text{со}}^{2/3}\,, \qquad (27)$$

где $R_{\text{со}}$ — предел прочности бетона на одноосное сжатие при температуре 70 °С, МПа.

5.4.1.3. По данным об $R_{\text{ро}}$, ΔV_0 и составе бетона любого другого состава на принятых компонентах определяют контракционный объем ΔV_i , достижение которого обеспечивает начальную прочность бетонной смеси, достаточную для предотвращения ее деструкции в начале стадии подъема температуры:

$$\Delta V_i=-\frac{V_i-\beta W_i}{2}-\frac{\Delta V_0 p_0\dfrac{W_i+V_i}{C_i}}{2R_{\text{ро}}\dfrac{W_0+V_0}{C_0}}+$$

$$+\sqrt{\frac{(V_i+\beta W_i)^2}{4}+\frac{\Delta V_0\dfrac{W_i+V_i}{C_i}}{R_{\text{ро}}\dfrac{W_0+V_0}{\tau_0}}\left[p_iV_i+\frac{p_0}{2}\left(\frac{\Delta V_0p_0}{2R_{\text{ро}}}-V_i+\beta W_i\right)\right]}\,, \qquad (28)$$

где W_i , V_i , C_i W_0, V_0, C_0 — параметры состава бетона, указанные в п. 5.2.1.5; β — коэффициент температурного расширения объема воды; p_0, p_i — давление соответственно атмосферное (в тепловой камере) и паровоздушной среды в порах слоев бетонной смеси, граничащих с нагревающей средой, МПа.

Значение p_i определяют предварительно по формуле

$$p_i=p_0\frac{T_i}{T_0}+p_2(T_i)-p_{\sigma T_0}\frac{\sigma_{T_i}}{\sigma T_0}\,, \qquad (29)$$

где p_{10} — усредненное давление воздуха в порах бетонной смеси при начальной температуре (температуре выдержки $T_0=273+t_0$ в К), МПа (значение давления p_{10} при температуре $t_0=20$ °С в зависимости от степени уплотнения бетонной смеси приведено в табл. 1 приложения 4); $p_2(T_i)$ — давление водяного пара в порах бетонной смеси, МПа (в зависимости от температуры приведено в табл. 2 приложения 4); T_i — температура (в К), нагревающей среды у поверхности бетона вначале ТВО ($T_i=273+t_i$); значения T_i рекомендуются принимать, равным 303; 308 и 313 К соответственно для ямных камер, тоннельных, конвейеров и кассетных установок; $p_{\sigma T_0}$ —давление, испытываемое воздухом в порах бетонной смеси от поверхностного натяжения воды, МПа (определяют

по табл. 1 приложения 4); σ_{T_0}, σ_{T_i} — поверхностное натяжение воды (в Дж/см²) при температуре соответственно T_0 и T_i (принимают по табл. 2 приложения 4).

5.4.1.4. Измеряют контракцию $\Delta V_{бt}$ бетона базового состава при принятой температуре выдержки и за оптимальную продолжительность выдержки бетонной смеси i-го состава принимают время, к которому выполняется равенство

$$\Delta V_{бi} = \frac{\Delta V_i \cdot C_б}{C_i}, \qquad (30)$$

где $C_б$, C_i — содержание (по массе) цемента в единице объема бетона соответственно базового и i-го составов.

5.4.2. Определение оптимальной скорости подъема температуры при тепловлажностной обработке (построение графика оптимального подъема температуры).

5.4.2.1. Измеряют и строят графики кинетики контракции базового материала при его ТВО по режиму, указанному в п. 5.4.1.1, с доведением до заданной температуры изотермии и при твердении в нормальных условиях в течение 6 ч.

5.4.2.2. Определяют контракционный объем базового материала $\Delta V_{бT_i}$ ко времени $\tau_и$ достижения заданной температуры изотермии и $\Delta V_{бн_i}$ к такому же времени $\tau_и$ нормального твердения.

5.4.2.3. Определяют по формуле (28) контракционный объем ΔV_{T_i} материала, для которого устанавливают оптимальную скорость подъема температуры.

Определение производят для T_i, равной температуре изотермии.

5.4.2.4. Определяют контракционную характеристику оптимизируемого материала $\Delta V_{нi}$ по зависимости

$$\Delta V_{нi} = \frac{\Delta V_{T_i}}{\Delta V_{бT_i}} \cdot \Delta V_{бн_i}. \qquad (31)$$

5.4.2.5. Определяют величину $\Delta V_{пi} = \Delta V_{нi} \cdot C_б / C_i$, где $C_б$ и C_i — содержание цемента в единице объема материала соответственно базового и оптимизируемого.

5.4.2.6. Находят на графике кинетики контракции базового материала ее значение, равное $\Delta V_{пi}$ и отмечают соответствующее ему время нормального твердения τ_{T_i}, равное времени завершения стадии оптимального подъема температуры (начала времени изотермии).

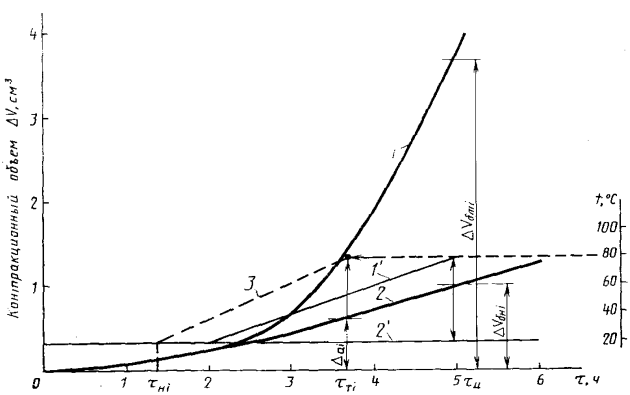
5.4.2.7. Строят график оптимального подъема температуры бетона. Для этого сначала находят на изотермической части темпе-

ратурного графика точку начала изотермии (соответствует время τ_{T_i}), затем ее соединяют прямой с точкой, завершающей график температуры предварительного выдерживания (ей соответствует время $\tau_{н_i}$). При необходимости по этому графику рассчитывают оптимальную скорость v_T подъема температуры, т. е.:

$$v_T = \frac{T_i - T_0}{\tau_{T_i} - \tau_{н_i}}, \qquad (32)$$

где T_0 — температура (по Кельвину) предварительного выдерживания смеси.

Примечание. На рис. 3 приведено построение графика оптимального подъема температуры *3* при температуре изотермии $T = 353$ К. Здесь кривые *1* и *2* — кинетика контракции базового материала соответственно при ТВО и в нормальных условиях. Им соответствуют температурные графики *1'* и *2'*.



5.4.3. Определение времени τ_i твердения материала, к которому должна быть достигнута требуемая прочность бетона.

5.4.3.1. Продолжительность твердения при тепловой обработке материала определяют по графику кинетики контракции, отсчитывая на нем то время, к которому контракционный объем ΔV_i достигает значения, отвечающего заданной прочности, т. е. при

$$\Delta V_i = \frac{\Delta V_0 \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^{2/3} \cdot (W_i + V_i)}{\frac{\Delta V_0}{K_2 \gamma_c}\left[1 - \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^{2/3}\right] + W + V_0}. \qquad (33)$$

Здесь ΔV_i, как и в п. 5.3.1.1, соответствует расходу вяжущего C_0.

5.4.3.2. Продолжительность твердения материала в нормальных условиях определяют по зависимости

$$\tau_i = \tau_0 \left(\frac{\Delta V_i}{\Delta V_0} \right)^{\frac{1}{m}}, \qquad (34)$$

или при экспрессном определении ΔV_i

$$\tau_i = (\tau_1 + \Delta\tau) \cdot \left(\frac{\Delta V_i}{\Delta V_1} \right)^{\frac{1}{m}}, \qquad (35)$$

где ΔV_i — контракционный объем, отвечающий наперед заданной прочности — см. формулу (21).

5.4.4. Определение оптимальной продолжительности $\tau_{i\text{опт}}$ изотермической стадии тепловой обработки материала.

5.4.4.1. При заданных значениях длительности предварительного выдерживания, скорости подъема температуры и температуры изотермии измеряют кинетику контракции материала в соответствии с п. 4.2.

За оптимальную продолжительность изотермической стадии принимают то время, отсчитываемое с ее начала, к которому относительный прирост контракционного объема ΔV_i или разности давлений Δp_i за 1 ч не превышает 3 %, что эквивалентно относительному приросту прочности материала на одноосное сжатие за это время не более 5 % (приросту, соизмеримому с погрешностью испытаний бетона на хорошем уровне точности). При этом принимают во внимание соответствие $\tau_{i\text{опт}}$ ритму технологического процесса.

5.4.5. *Определение оптимальной температуры изотермии* материала при его тепловой обработке.

5.4.5.1. Осуществляют три опыта по определению кинетики контракции материала одного состава при температуре изотермии 70, 80 и 95 °С, которые завершают (приступают к охлаждению) к моменту достижения $\tau_{\text{иопт}}$ или ко времени $\tau_{\text{в}}$ начала охлаждения, определяемого ритмом технологического процесса изготовления продукции, а не оптимальным использованием вяжущих свойств цемента при тепловой обработке.

5.4.5.2. За оптимальную температуру $t_{\text{иопт}}$, когда охлаждение начинают с момента $\tau_{\text{иопт}}$, принимают ту, при которой в момент $\tau_{\text{иопт}}$ отношение $\frac{(\tau_{\text{п}} + 2\tau_{\text{иопт}}) t_{\text{и}}}{2\Delta V_i}$ является наименьшим. Здесь $\tau_{\text{п}}$ — продолжительность подъема температуры до изотермического уровня (в часах), $t_{\text{и}}$ — температура изотермии.

5.4.5.3. За оптимальную температуру $t_{\text{иопт}}$, когда охлаждение начинают с момента $\tau_{\text{в}}$, принимают ту, при которой в момент $\tau_{\text{в}}$ контракционный объем ΔV_i достигает наибольшего значения.

Примечание. В обоих случаях (п. 5.4.5.2 и п. 5.4.5.3) принимают во внимание наличие энергетических возможностей обеспечения установленного значения $t_{иопт}$. Если такие возможности ограничены, то принимают во внимание соответствующую им ближайшую $t_и$ (для этого можно воспользоваться и простейшей интерполяцией контракции по температуре изотермии к моментам $\tau_в$ или $\tau_{иопт}$).

5.4.6. Определение оптимальной скорости v_{t0} подъема температуры до изотермической стадии тепловой обработки материала.

Вспомогательные таблицы значений величин, используемых при определении контракционного объема

Таблица 1

Значения логарифмов числа N

N	lg N	N	lg N	N	lg N
1,20	0,08	2,15	0,33	3,70	0,57
1,25	0,10	2,20	0,34	3,80	0,58
1,30	0,11	2,25	0,35	3,90	0,59
1,35	0,13	2,30	0,36	4,00	0,60
1,40	0,15	2,35	0,37	4,20	0,62
1,45	0,16	2,40	0,38	4,40	0,64
1,50	0,18	2,45	0,39	4,60	0,66
1,55	0,19	2,50	0,40	4,80	0,68
1,60	0,20	2,60	0,42	5,00	0,67
1,65	0,22	2,70	0,43	5,20	0,72
1,70	0,23	2,80	0,44	5,40	0,73
1,75	0,24	2,90	0,46	5,60	0,75
1,80	0,25	3,00	0,48	5,80	0,76
1,85	0,27	3,10	0,49	6,00	0,78
1,90	0,28	3,20	0,51	6,30	0,80
1,95	0,29	3,30	0,52	6,60	0,82
2,00	0,30	3,40	0,53	6,90	0,84
2,05	0,31	3,50	0,54	7,00	0,85
2,10	0,32	3,60	0,56	7,30	0,86

Таблица 2

Значения чисел N, возведенных в степень m

N	m=0,11	m=0,12	m=0,13	m=0,14	m=0,15	m=0,16	m=0,17	m=0,18	m=0,19	m=0,20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				$0,11 \leqslant m \leqslant 0,20$						
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,1	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
1,2	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04
1,3	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05
1,4	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07
1,5	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08
1,6	1,05	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10
1,7	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11
1,8	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
1,9	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14
2,0	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15
2,4	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
2,9	1,12	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,20	1,21	1,22	1,24
3,4	1,14	1,16	1,17	1,19	1,20	1,22	1,23	1,25	1,26	1,28
4,1	1,17	1,18	1,20	1,22	1,24	1,25	1,27	1,29	1,31	1,33
4,9	1,19	1,21	1,23	1,25	1,27	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37
5,8	1,21	1,23	1,26	1,28	1,30	1,32	1,35	1,37	1,40	1,42
6,3	1,24	1,26	1,29	1,31	1,34	1,36	1,39	1,39	1,42	1,45
10	1,26	1,29	1,32	1,34	1,34	1,40	1,43	1,51	1,55	1,58
12	1,29	1,32	1,35	1,36	1,41	1,45	1,48	1,56	1,60	1,64
14	1,31	1,35	1,38	1,42	1,45	1,49	1,53	1,61	1,65	1,70
17	1,37	1,37	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57	1,67	1,71	1,76
20	1,39	1,40	1,45	1,49	1,53	1,57	1,62	1,71	1,77	1,82
24	1,42	1,46	1,51	1,56	1,61	1,66	1,72	1,77	1,83	1,89
29	1,45	1,50	1,55	1,60	1,66	1,71	1,77	1,83	1,90	1,96
34	1,47	1,53	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,87	1,95	2,02
41	1,5	1,56	1,62	1,68	1,75	1,81	1,88	1,95	2,03	2,10
49	1,53	1,60	1,66	1,72	1,79	1,86	1,94	2,01	2,09	2,18

Продолжение

N	$m=0{,}11$	$m=0{,}12$	$m=0{,}13$	$m=0{,}14$	$m=0{,}15$	$m=0{,}16$	$m=0{,}17$	$m=0{,}18$	$m=0{,}19$	$m=0{,}20$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
58	1,56	1,63	1,70	1,77	1,84	1,91	1,99	2,08	2,16	2,25
70	1,60	1,66	1,74	1,81	1,89	1,97	2,06	2,15	2,24	2,34
83	1,63	1,70	1,78	1,86	1,94	2,03	2,12	2,22	2,32	2,42
100	1,66	1,74	1,82	1,91	2,00	2,09	2,19	2,29	2,40	2,51
120	1,69	1,78	1,86	1,95	2,05	2,15	2,26	2,37	2,48	2,61
140	1,72	1,81	1,90	2,00	2,10	2,20	2,32	2,43	2,56	2,69
170	1,76	1,85	1,95	2,05	2,16	2,27	2,39	2,52	2,65	2,79
200	1,79	1,89	1,99	2,10	2,21	2,33	2,46	2,60	2,74	2,89
240	1,83	1,93	2,04	2,15	2,28	2,40	2,54	2,68	2,84	2,99
290	1,87	1,97	2,09	2,21	2,34	2,48	2,62	2,77	2,94	3,11
350	1,90	2,02	2,14	2,27	2,41	2,55	2,71	2,87	3,04	3,23
410	1,94	2,06	2,19	2,32	2,47	2,62	2,78	2,95	3,14	3,33
500	1,98	2,11	2,24	2,39	2,54	2,70	2,88	3,06	3,26	3,47
590	2,02	2,15	2,29	2,44	2,60	2,78	3,00	3,15	3,36	3,58
700	2,06	2,19	2,34	2,50	2,67	2,85	3,05	3,25	3,47	3,71

Продолжение

N	$m=0{,}21$	$m=0{,}22$	$m=0{,}23$	$m=0{,}24$	$m=0{,}25$	$m=0{,}26$	$m=0{,}27$	$m=0{,}28$	$m=0{,}29$	$m=0{,}3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
					$0{,}2<m\leqslant 0{,}3$					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03
1,2	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
1,3	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	1,08
1,4	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11
1,5	1,09	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13

Продолжение

N	m=0,21	m=0,22	m=0,23	m=0,24	m=0,25	m=0,26	m=0,27	m=0,28	m=0,29	m=0,3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,6	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
1,7	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17
1,8	1,13	1,14	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18	1,19
1,9	1,14	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21
2,0	1,16	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23
2,4	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30
2,9	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,32	1,33	1,35	1,36	1,38
3,4	1,29	1,31	1,33	1,34	1,36	1,37	1,39	1,41	1,43	1,44
4,1	1,34	1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48	1,51	1,53
4,9	1,40	1,42	1,44	1,46	1,49	1,51	1,54	1,56	1,59	1,61
5,8	1,44	1,47	1,50	1,52	1,55	1,59	1,61	1,64	1,66	1,69
6,3	1,47	1,50	1,53	1,56	1,58	1,61	1,64	1,67	1,71	1,74
10	1,62	1,66	1,70	1,74	1,78	1,82	1,86	1,91	1,95	1,99
12	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,91	1,96	2,00	2,06	2,11
14	1,74	1,79	1,83	1,88	1,93	1,99	2,04	2,09	2,15	2,21
17	1,81	1,87	1,92	1,97	2,03	2,09	2,15	2,21	2,27	2,34
20	1,88	1,93	1,99	2,05	2,11	2,18	2,25	2,31	2,38	2,46
24	1,95	2,01	2,08	2,14	2,21	2,28	2,36	2,43	2,51	2,59
29	2,03	2,10	2,17	2,24	2,32	2,40	2,48	2,57	2,66	2,75
31	2,06	2,13	2,20	2,28	2,36	2,44	2,53	2,62	2,71	2,80
41	2,18	2,26	2,35	2,44	2,53	2,63	2,73	2,83	2,94	3,05
49	2,26	2,35	2,45	2,54	2,65	2,75	2,86	2,97	3,09	3,21
58	2,35	2,44	2,54	2,65	2,76	2,87	2,99	3,12	3,25	3,38
70	2,44	2,55	2,66	2,77	2,89	3,02	3,15	3,29	3,43	3,58
83	2,53	2,64	2,76	2,89	3,02	3,15	3,30	3,45	3,60	3,76
100	2,63	2,75	2,88	3,02	3,16	3,31	3,47	3,63	3,80	3,98
120	2,73	2,87	3,01	3,16	3,31	3,47	3,64	3,82	4,01	4,20
140	2,82	2,97	3,12	3,27	3,44	3,61	3,80	3,99	4,19	4,40
170	2,94	3,10	3,26	3,43	3,61	3,80	4,00	4,21	4,43	4,67
200	3,04	3,21	3,38	3,57	3,76	3,97	4,18	4,41	4,65	4,90
240	3,16	3,34	3,53	3,73	3,94	4,16	4,39	4,64	4,90	5,18

Продолжение

N	$m=0{,}21$	$m=0{,}22$	$m=0{,}23$	$m=0{,}24$	$m=0{,}25$	$m=0{,}26$	$m=0{,}27$	$m=0{,}28$	$m=0{,}29$	$m=0{,}3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
290	3,29	3,48	3,68	4,13	4,13	4,37	4,62	4,89	5,18	5,48
350	3,42	3,63	3,85	4,08	4,33	4,59	4,86	5,16	5,47	5,80
410	3,54	3,76	3,99	4,24	4,50	4,78	5,08	5,39	5,72	6,08
500	3,69	3,92	4,18	4,44	4,73	5,03	5,35	5,70	6,06	6,45
590	3,82	4,07	4,34	4,62	4,93	5,25	5,60	5,97	6,36	6,78
700	3,96	4,23	4,51	4,82	5,14	5,49	5,86	6,26	6,68	7,14

Таблица 3

Значения чисел N, возведенных в степень $1/m$

Значение числа N	$\frac{1}{0{,}11}$	$\frac{1}{0{,}12}$	$\frac{1}{0{,}13}$	$\frac{1}{0{,}14}$	$\frac{1}{0{,}15}$	$\frac{1}{0{,}16}$	$\frac{1}{0{,}17}$	$\frac{1}{0{,}18}$	$\frac{1}{0{,}19}$	$\frac{1}{0{,}20}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$\left(\frac{1}{0{,}11} \leqslant \frac{1}{m} \leqslant \frac{1}{0{,}20}\right)$									
1,01	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05
1,02	1,21	1,19	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10
1,03	1,31	1,28	1,26	1,24	1,22	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16
1,04	1,43	1,39	1,35	1,32	1,29	1,28	1,26	1,24	1,23	1,22
1,05	1,55	1,50	1,45	1,41	1,38	1,35	1,33	1,31	1,30	1,28
1,06	1,69	1,62	1,56	1,51	1,47	1,43	1,40	1,38	1,36	1,34
1,07	1,84	1,75	1,67	1,61	1,56	1,52	1,48	1,46	1,43	1,40
1,08	2,00	1,88	1,79	1,72	1,66	1,61	1,56	1,53	1,50	1,47
1,09	2,17	2,03	1,93	1,84	1,76	1,71	1,65	1,61	1,58	1,54
1,10	2,36	2,20	2,07	1,97	1,88	1,80	1,75	1,70	1,66	1,61
1,11	2,58	2,38	2,23	2,11	2,00	1,92	1,85	1,79	1,74	1,69
1,12	2,81	2,57	2,39	2,25	2,13	2,03	1,91	1,88	1,82	1,76

Продолжение

Значение числа N	$\frac{I}{0,11}$	$\frac{I}{0,12}$	$\frac{I}{0,13}$	$\frac{I}{0,14}$	$\frac{I}{0,15}$	$\frac{I}{0,16}$	$\frac{I}{0,17}$	$\frac{I}{0,18}$	$\frac{I}{0,19}$	$\frac{I}{0,20}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,13	3,06	2,79	2,58	2,41	2,27	2,16	2,06	1,97	1,91	1,84
1,14	3,30	2,98	2,75	2,55	2,40	2,27	2,16	2,07	2,00	1,93
1,15	3,57	3,20	2,93	2,72	2,54	2,39	2,28	2,18	2,10	2,01
1,16	3,86	3,44	3,14	2,89	2,69	2,53	2,39	2,28	2,20	2,10
1,17	4,18	3,72	3,35	3,07	2,84	2,67	2,52	2,39	2,30	2,19
1,18	4,52	3,96	3,58	3,27	3,01	2,82	2,65	2,51	2,40	2,29
1,19	4,86	4,25	3,81	3,47	3,19	2,96	2,78	2,63	2,51	2,39
1,20	5,25	4,56	4,07	3,68	3,37	3,13	2,92	2,76	2,63	2,49
1,21	5,69	4,90	4,35	3,91	3,57	3,29	3,07	2,89	2,75	2,59
1,22	6,26	5,25	4,62	4,15	3,77	3,47	3,22	3,02	2,87	2,70
1,23	6,58	5,62	4,93	4,40	3,98	3,65	3,38	3,16	3,00	2,82
1,24	6,58	6,00	5,25	4,68	4,20	3,84	3,55	3,31	3,13	2,93
1,25	7,62	6,42	5,57	4,93	4,43	4,03	3,71	3,46	3,26	3,05
1,26	8,22	6,88	5,94	5,23	4,68	4,25	3,90	3,61	3,40	3,18
1,27	8,79	7,16	6,31	5,53	4,81	4,46	4,07	3,78	3,55	3,30
1,28	9,44	7,81	6,68	5,84	5,18	4,67	4,27	3,95	3,70	3,44
1,29	10,2	8,32	7,11	6,17	5,46	4,92	4,47	4,12	3,86	3,57
1,30	10,9	8,90	7,53	6,52	5,57	5,15	4,68	4,30	4,02	3,71
1,31	11,7	9,47	7,99	6,88	6,05	5,40	4,88	4,49	4,18	3,86
1,32	12,5	10,1	8,46	7,28	6,37	5,66	5,12	4,68	4,36	4,01
1,33	13,4	10,8	9,00	7,69	6,68	5,94	5,35	4,88	4,53	4,16
1,34	14,4	11,4	9,51	8,09	7,04	6,22	5,59	5,10	4,72	4,32
1,35	15,3	12,2	10,1	8,55	7,38	6,51	5,82	5,30	4,91	4,48
1,36	16,4	13,0	10,7	9,00	7,76	6,82	6,09	5,53	5,10	4,65
1,37	17,5	13,8	11,3	9,50	8,13	7,14	6,36	5,76	5,30	4,83
1,38	18,8	14,6	11,9	10,0	8,56	7,48	6,65	6,00	5,51	5,00
1,39	20,0	15,5	12,6	10,5	8,97	7,82	6,92	6,24	5,73	5,19
1,40	21,4	16,5	13,3	11,1	9,40	8,19	7,21	6,49	5,95	5,38
1,41	22,8	17,5	14,1	11,6	9,88	8,56	7,55	6,76	6,18	5,57
1,42	24,2	18,6	14,8	12,2	10,4	8,95	7,87	7,03	6,41	5,77
1,43	25,8	19,7	15,7	12,9	10,9	9,35	8,20	7,31	6,66	5,98
1,44	27,5	20,9	16,5	13,5	11,4	9,77	8,54	7,59	6,91	6,19

Продолжение

Значение числа N	$\frac{I}{0,11}$	$\frac{I}{0,12}$	$\frac{I}{0,13}$	$\frac{I}{0,14}$	$\frac{I}{0,15}$	$\frac{I}{0,16}$	$\frac{I}{0,17}$	$\frac{I}{0,18}$	$\frac{I}{0,19}$	$\frac{I}{0,20}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,45	29,3	22,1	17,4	14,2	11,9	10,2	8,90	7,90	7,17	6,41
1,46	31,2	23,4	18,4	14,9	12,5	10,6	9,26	8,20	7,43	6,63
1,47	33,2	24,8	19,4	15,7	13,0	11,1	9,64	8,52	7,71	6,86
1,48	35,3	26,2	20,4	16,4	13,6	11,6	10,0	8,84	7,99	7,10
1,49	37,5	27,7	21,5	17,3	14,3	12,1	10,4	9,18	8,28	7,34
1,50	39,8	29,3	22,6	18,1	14,9	12,6	10,9	9,53	8,58	7,59
1,51	42,4	31,0	22,8	19,0	15,6	13,1	11,3	9,89	8,88	7,85
1,52	45,0	32,8	25,0	19,9	16,3	13,7	11,7	10,3	9,20	8,11
1,53	47,8	34,6	26,3	20,9	17,0	14,3	12,2	10,6	9,52	8,38
1,54	50,7	36,5	27,7	21,8	17,8	14,9	12,7	11,0	9,86	8,66
1,55	53,7	38,6	29,1	22,9	18,6	15,5	13,2	11,4	10,2	8,95
1,56	57,0	40,7	30,6	24,0	19,4	16,1	13,7	11,9	10,6	9,24
1,57	60,4	42,9	32,1	25,1	20,2	16,8	14,2	12,3	10,9	9,54
1,58	64,0	45,2	33,7	26,2	21,1	17,4	14,7	12,7	11,3	9,85
1,59	67,7	47,7	35,4	27,5	22,0	18,1	15,3	13,2	11,7	10,2
1,60	71,7	50,2	37,2	28,7	23,0	18,9	15,9	13,6	12,1	10,5
1,61	75,9	52,9	39,0	30,0	23,9	19,6	16,5	14,1	12,5	10,8
1,62	80,3	55,7	40,9	31,4	24,9	20,4	17,1	14,6	12,9	11,2
1,63	84,9	58,6	42,9	32,8	26,0	21,2	17,7	15,1	13,3	11,5
1,64	89,8	61,7	45,0	34,2	27,1	22,0	18,4	15,7	13,8	11,9
1,65	94,9	64,9	47,1	35,8	28,2	22,9	19,0	16,2	14,2	12,2
1,66	100,0	68,3	49,3	37,3	29,3	23,8	19,7	16,7	14,7	12,6
1,67	106	71,8	51,7	39,0	30,5	24,7	20,4	17,3	15,1	13,0
1,68	112	75,4	54,0	40,7	31,8	25,6	21,2	17,9	15,6	13,4
1,69	118	79,3	56,6	42,4	33,1	26,6	21,9	18,5	16,1	13,8
1,70	124	83,3	59,2	44,3	34,4	27,6	22,7	19,1	16,6	14,2
1,71	131	87,4	62,0	46,2	35,8	28,6	23,5	19,7	17,2	14,6
1,72	138	91,8	64,8	48,1	37,2	29,7	24,3	20,4	17,7	15,1
1,73	146	96,3	67,8	50,2	38,6	30,7	25,1	21,7	18,3	15,5
1,74	154	101	70,9	52,3	40,1	31,9	26,0	21,7	18,8	15,9
1,75	162	106	74,0	54,4	41,7	33,0	26,9	22,5	19,4	16,4
1,76	171	111	77,4	56,7	43,3	34,2	27,8	23,2	20,0	16,9

Продолжение

Значение числа N	$\frac{I}{0,11}$	$\frac{I}{0,12}$	$\frac{I}{0,13}$	$\frac{I}{0,14}$	$\frac{I}{0,15}$	$\frac{I}{0,16}$	$\frac{I}{0,17}$	$\frac{I}{0,18}$	$\frac{I}{0,19}$	$\frac{I}{0,20}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,77	180	117	80,8	59,1	45,5	35,5	28,8	23,9	20,6	17,4
1,78	189	122	84,4	61,5	46,7	36,7	29,7	24,7	21,2	17,9
1,79	199	128	88,1	64,0	48,5	38,0	30,7	25,5	21,9	18,4
1,80	209	134	92,0	66,6	50,3	39,4	31,7	26,3	22,5	18,9
1,81	220	140	96,0	69,3	52,2	40,8	32,8	27,1	23,2	19,4
1,82	231	147	100	72,1	54,2	42,2	33,9	27,9	23,9	20,0
1,83	243	154	104	74,9	56,2	43,7	35,0	28,8	24,6	20,5
1,84	256	161	109	77,9	58,3	45,2	36,1	29,7	25,3	21,1
1,85	268	168	114	81,0	60,4	46,8	37,3	30,6	26,1	21,7
1,86	281	176	118	84,2	62,6	48,4	38,5	31,5	26,8	22,3
1,87	296	184	123	87,4	64,9	50,0	39,7	32,5	27,6	22,9
1,88	311	193	129	90,8	67,3	51,7	41,0	33,4	28,4	23,5
1,89	326	201	134	94,3	69,7	53,4	42,3	34,4	29,2	24,1
1,90	342	210	139	98,0	72,2	55,2	43,6	35,4	30,0	24,8
1,91	359	220	145	102	74,7	57,1	45,0	36,5	30,9	25,4
1,92	377	230	151	106	77,4	59,0	46,4	37,6	31,7	26,1
1,93	394	240	157	110	80,1	60,9	47,8	38,7	32,6	26,8
1,94	413	250	164	114	82,9	62,9	49,3	39,8	33,5	27,5
1,95	433	261	170	118	85,8	65,0	50,8	41,0	34,4	28,2
1,96	454	273	177	122	88,8	67,1	52,4	42,2	35,4	28,9
1,97	475	284	184	127	91,9	69,2	54,0	43,4	36,4	29,7
1,98	498	297	194	132	95,0	71,5	55,6	44,6	37,4	30,4
1,99	521	309	199	136	98,3	73,8	57,3	45,9	38,4	31,2
2,00	545	323	207	141	101,6	76,1	59,0	47,2	39,4	40,0

Продолжение

N	$\frac{I}{0,21}$	$\frac{I}{0,22}$	$\frac{I}{0,23}$	$\frac{I}{0,24}$	$\frac{I}{0,25}$	$\frac{I}{0,26}$	$\frac{I}{0,27}$	$\frac{I}{0,28}$	$\frac{I}{0,29}$	$\frac{I}{0,30}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				$\frac{1}{0,2} < \frac{1}{m} \leqslant \frac{1}{0,3}$						
1,01	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03
1,02	1,10	1,09	1,09	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07
1,03	1,15	1,14	1,14	1,13	1,13	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11
1,04	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16	1,16	1,15	1,14	1,14
1,05	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17
1,06	1,32	1,30	1,29	1,28	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,21
1,07	1,38	1,36	1,34	1,33	1,31	1,30	1,28	1,27	1,26	1,25
1,08	1,44	1,42	1,40	1,38	1,36	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29
1,09	1,51	1,48	1,45	1,43	1,41	1,39	1,38	1,36	1,35	1,33
1,1	1,57	1,54	1,51	1,49	1,46	1,44	1,42	1,41	1,39	1,37
1,11	1,64	1,61	1,57	1,55	1,52	1,49	1,47	1,45	1,43	1,41
1,12	1,72	1,67	1,64	1,60	1,57	1,55	1,52	1,50	1,48	1,45
1,13	1,79	1,74	1,70	1,66	1,63	1,60	1,57	1,55	1,52	1,50
1,14	1,87	1,82	1,77	1,73	1,69	1,66	1,62	1,60	1,57	1,54
1,15	1,95	1,89	1,84	1,79	1,75	1,71	1,68	1,65	1,62	1,59
1,16	2,03	1,96	1,91	1,86	1,81	1,77	1,73	1,70	1,67	1,63
1,17	2,11	2,04	1,98	1,92	1,87	1,83	1,79	1,75	1,72	1,68
1,18	2,20	2,12	2,05	2,00	1,94	1,98	1,89	1,84	1,74	1,73
1,19	2,29	2,21	2,13	2,07	2,01	1,95	1,90	1,86	1,82	1,78
1,20	2,38	2,29	2,21	2,14	2,07	2,02	1,96	1,92	1,88	1,83
1,21	2,48	2,38	2,29	2,21	2,14	2,08	2,02	1,97	1,93	1,88
1,22	2,58	2,47	2,38	2,29	2,21	2,15	2,09	2,03	1,99	1,93
1,23	2,68	2,56	2,46	2,37	2,29	2,22	2,15	2,09	2,04	1,98
1,24	2,78	2,66	2,55	2,45	2,36	2,29	2,22	2,16	2,10	2,03
1,25	2,89	2,76	2,64	2,54	2,44	2,36	2,28	2,22	2,16	2,09
1,26	3,00	2,86	2,73	2,62	2,52	2,43	2,35	2,28	2,22	2,14
1,27	3,12	2,97	2,83	2,71	2,60	2,51	2,42	2,35	2,28	2,20
1,28	3,24	3,07	2,93	2,80	2,68	2,59	2,49	2,41	2,34	2,26

Продолжение

N	$\frac{I}{0,21}$	$\frac{I}{0,22}$	$\frac{I}{0,23}$	$\frac{I}{0,24}$	$\frac{I}{0,25}$	$\frac{I}{0,26}$	$\frac{I}{0,27}$	$\frac{I}{0,28}$	$\frac{I}{0,29}$	$\frac{I}{0,30}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,29	3,36	3,19	3,03	2,89	2,77	2,67	2,57	2,48	2,41	2,32
1,30	3,49	3,30	3,13	2,99	2,86	2,75	2,64	2,55	2,47	2,38
1,31	3,62	3,42	3,24	3,08	2,94	2,83	2,72	2,62	2,54	2,44
1,32	3,75	3,54	3,35	3,18	3,04	2,91	2,79	2,69	2,61	2,50
1,33	3,89	3,66	4,46	3,28	3,13	3,00	2,87	2,77	2,67	2,56
1,34	4,03	3,79	3,57	3,39	3,22	3,09	2,95	2,87	2,44	2,63
1,35	4,17	3,92	3,69	3,50	3,32	3,18	3,04	2,92	2,82	2,69
1,36	4,32	4,05	3,81	3,60	3,42	3,27	3,12	3,00	2,89	2,76
1,37	4,47	4,19	3,93	3,72	3,52	3,36	3,21	3,08	2,96	2,83
1,38	4,63	4,33	4,06	3,83	3,63	3,46	3,29	3,16	3,04	2,89
1,39	4,00	4,47	4,19	3,95	3,73	3,55	3,38	3,24	3,11	2,96
1,4	4,96	4,62	4,32	4,07	3,84	3,65	3,47	3,32	3,19	3,04
1,41	5,13	4,77	4,46	4,19	3,95	3,75	3,57	3,41	3,27	3,11
1,42	5,31	4,93	4,60	4,32	4,07	3,86	3,66	3,50	3,35	3,18
1,43	5,49	5,09	4,74	4,44	4,18	3,96	3,76	3,59	3,43	3,26
1,44	5,67	5,25	4,89	4,57	4,30	4,07	3,85	3,68	3,52	3,33
1,45	5,86	5,42	5,03	4,71	4,42	4,18	3,95	3,77	3,60	3,41
1,46	6,06	5,60	5,19	4,85	4,54	4,29	4,06	3,86	3,69	3,49
1,47	6,26	5,77	5,34	4,99	4,67	4,41	4,16	3,96	3,78	3,57
1,48	6,46	5,95	5,50	5,13	4,80	4,52	4,27	4,05	3,87	3,65
1,49	6,67	6,14	5,67	5,27	4,93	4,64	4,37	4,15	3,96	3,73
1,5	6,89	6,33	5,83	5,42	5,06	4,67	4,48	4,25	4,05	3,81
1,51	7,11	6,52	6,01	5,58	5,20	4,89	4,59	4,35	4,14	3,90
1,52	7,34	6,72	6,18	5,73	5,34	5,01	4,71	4,46	4,24	3,98
1,53	7,57	6,92	6,36	5,89	5,48	5,14	4,82	4,56	4,34	4,07
1,54	7,81	7,13	6,54	6,05	5,62	5,27	4,94	4,67	4,44	4,16
1,55	8,05	7,35	6,73	6,22	5,77	5,40	5,06	4,76	4,51	4,25
1,56	8,30	7,56	6,92	6,39	5,92	5,54	5,18	4,89	4,64	4,34
1,57	8,56	7,79	7,11	6,56	6,08	5,68	5,31	5,00	4,74	4,43
1,58	8,82	8,01	7,31	6,74	6,23	5,82	5,43	5,12	4,85	4,52
1,59	9,09	8,25	7,52	6,92	6,39	5,96	5,56	5,24	4,95	4,62
1,6	9,37	8,49	7,73	7,10	6,55	6,11	5,69	5,35	5,06	4,72

Продолжение

N	$\frac{I}{0,21}$	$\frac{I}{0,22}$	$\frac{I}{0,23}$	$\frac{I}{0,24}$	$\frac{I}{0,25}$	$\frac{I}{0,26}$	$\frac{I}{0,27}$	$\frac{I}{0,28}$	$\frac{I}{0,29}$	$\frac{I}{0,30}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,61	9,65	8,73	7,94	7,29	6,72	6,26	5,82	5,47	5,17	4,81
1,62	9,94	8,98	8,15	7,48	6,89	6,41	5,96	5,60	5,28	4,91
1,63	10,2	9,24	8,38	7,67	7,06	6,56	6,10	5,72	5,40	5,01
1,64	10,5	9,50	8,60	7,87	7,23	6,72	6,24	5,85	5,51	5,12
1,65	10,8	9,76	8,83	8,07	7,41	6,88	6,38	5,98	5,63	5,22
1,66	11,2	10,0	9,07	8,28	7,59	7,04	6,52	6,11	5,75	5,33
1,67	11,5	10,3	9,31	8,49	7,78	7,20	6,67	6,24	5,87	5,43
1,68	11,8	10,6	9,55	8,70	7,97	7,37	6,82	6,37	5,99	5,54
1,69	12,2	10,9	9,80	8,92	8,16	7,54	6,97	6,51	6,11	5,65
1,7	12,5	11,2	10,1	9,14	8,35	7,71	7,12	6,65	6,24	5,76
1,71	12,9	11,5	10,3	9,37	8,55	7,89	7,28	6,79	6,37	5,87
1,72	13,2	11,8	10,6	9,60	8,75	8,07	7,44	6,93	6,49	5,99
1,73	13,6	12,1	10,9	9,83	8,96	8,25	7,60	7,08	6,63	6,10
1,74	14,0	12,4	11,1	10,1	9,17	8,44	7,76	7,22	6,76	6,22
1,75	14,4	12,8	11,4	10,3	9,38	8,62	7,93	7,37	6,89	6,34
1,76	14,7	13,1	11,7	10,6	9,60	8,81	8,10	7,52	7,03	6,46
1,77	15,1	13,4	12,0	10,5	9,82	9,01	8,27	7,8	7,17	6,58
1,78	15,6	13,8	12,3	11,1	10,0	9,21	8,44	7,83	7,31	6,70
1,79	16,0	14,1	12,6	11,3	10,3	9,41	8,62	7,99	7,45	6,83
1,8	16,4	14,5	12,9	11,6	10,5	9,61	8,80	8,15	7,60	6,96
1,81	16,8	14,9	13,2	11,9	10,7	9,82	8,98	8,32	7,74	7,08
1,82	17,3	15,3	13,5	12,1	11,0	10,0	9,17	8,48	7,89	7,21
1,83	17,8	15,6	13,9	12,4	11,2	10,2	9,36	8,65	8,04	7,35
1,84	18,2	16,0	14,2	12,7	11,5	10,5	9,55	8,82	8,20	7,48
1,85	18,7	16,4	14,5	13,0	11,7	10,7	9,74	8,98	8,35	7,61
1,86	19,2	16,8	14,9	13,3	12,0	10,9	9,94	9,17	8,51	7,75
1,87	19,7	17,3	15,2	13,6	12,2	11,1	10,1	9,34	8,67	7,89
1,88	20,2	17,7	15,6	13,9	12,5	11,4	10,3	9,52	8,83	8,03
1,89	20,7	18,1	15,9	14,2	12,8	11,6	10,5	9,70	8,99	8,17
1,9	21,2	18,5	16,3	14,5	13,0	11,8	10,7	9,89	9,16	8,32
1,91	21,8	19,0	16,7	14,9	13,3	12,1	11,0	10,1	9,32	8,46
1,92	22,3	19,5	17,1	15,2	13,6	12,3	11,2	10,3	9,42	8,61

Продолжение

N	$\frac{I}{0,21}$	$\frac{I}{0,22}$	$\frac{I}{0,23}$	$\frac{I}{0,24}$	$\frac{I}{0,25}$	$\frac{I}{0,26}$	$\frac{I}{0,27}$	$\frac{I}{0,28}$	$\frac{I}{0,29}$	$\frac{I}{0,30}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,93	22,9	19,9	17,5	15,5	13,9	12,6	11,4	10,5	9,66	8,76
1,94	23,4	20,4	17,9	15,9	14,2	12,8	11,6	10,7	9,84	8,91
1,95	24,0	20,9	18,3	16,2	14,5	13,1	11,8	10,8	10,0	9,06
1,96	24,6	21,4	18,7	16,5	14,8	13,3	12,1	11,0	10,2	9,21
1,97	25,2	21,9	19,1	16,9	15,1	13,6	12,3	11,3	10,4	9,37
1,98	25,8	22,4	19,5	17,3	15,4	13,9	12,5	11,5	10,6	9,53
1,99	26,5	22,9	19,9	17,6	15,7	14,1	12,8	11,7	10,7	9,69
2,00	27,1	23,4	20,4	18,0	16,0	14,4	13,0	11,9	10,9	9,85

Таблица 4

Значения корректировочных коэффициентов для V_1 и m в зависимости от W/C

Тип цемента	Значения W/C													
	0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		0,9	
	Значения корректировочных коэффициентов для ΔV_1 и m													
	ΔV_1	m	ΔV_1	m	ΔV_1	m	ΔV_1	m	ΔV_1	m	ΔV_1	m	ΔV_1	m
Алюминатный	0,9	0,98	1	1	1,02	1,02	1,03	1,02	1,04	1,03	1,05	1,04	1,06	1,06
Алюминатно-алитовый	0,92	0,97	1	1	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05
Алитовый	0,93	0,96	1	1	1,01	1,03	1,02	1,04	1,03	1,05	1,03	1,05	1,04	1,06
Белитовый, ШПЦ	0,95	0,95	1	1	1,00	1,03	1,01	1,05	1,02	1,03	1,03	1,06	1,03	1,07

Вспомогательные таблицы значений величин, используемых при определении характеристик структурообразования цементных материалов

Таблица 1

Значения констант контракции цементов при $t \leqslant 100$ °С

Тип цемента	K_1	K_2 $L'=0,4$	K_3 $L'=0,4$ $\gamma_W=1$ г/см³	K_4 при различных значениях γ_c				
				2,85	2,9	3,0	3,1	3,2
Алюминатный	0,31	0,12	2,2	—	—	—	—	4,8
Алюминатно-алитовый, БТЦ	0,28	0,11	2,6	—	—	—	5,5	5,4
Обычный (алитовый)	0,26	0,10	2,8	—	—	6,1	5,9	—
Белитовый, ШПЦ	0,23	0,09	3,3	7,2	7,1	7,0	6,9	—

Вспомогательные таблицы значений величин, используемых при определении прочности бетона

Таблица 1

Значения чисел N, возведенных в степень 3/2

Значение числа N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,9	0,86	0,87	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98
0,8	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84
0,7	0,58	0,60	0,61	0,63	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,70
0,6	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,54	0,55	0,56	0,57
0,5	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
0,4	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
0,3	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24
0,2	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16
0,1	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08
1,0	1,00	1,01	1,03	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11	1,12	1,14
1,1	1,15	1,17	1,19	1,20	1,22	1,23	1,25	1,27	1,28	1,30
1,2	1,31	1,33	1,35	1,36	1,38	1,40	1,41	1,43	1,45	1,47
1,3	1,48	1,50	1,52	1,53	1,55	1,57	1,59	1,60	1,62	1,64
1,4	1,66	1,67	1,69	1,71	1,73	1,75	1,77	1,78	1,80	1,82
1,5	1,84	1,86	1,87	1,89	1,91	1,93	1,95	1,97	1,99	2,01
1,6	2,02	2,04	2,06	2,08	2,10	2,12	2,14	2,16	2,18	2,20
1,7	2,22	2,24	2,26	2,28	2,30	2,31	2,34	2,36	2,38	2,40
1,8	2,42	2,43	2,46	2,48	2,50	2,52	2,54	2,56	2,58	2,60
1,9	2,62	2,64	2,66	2,68	2,70	2,72	2,74	2,77	2,79	2,81
2,0	2,83	2,85	2,87	2,89	2,91	2,93	2,96	2,98	3,00	3,00
2,1	3,04	3,06	3,09	3,11	3,13	3,15	3,16	3,20	3,22	3,24
2,2	3,26	3,28	3,31	3,33	3,35	3,37	3,40	3,42	3,44	3,47
2,3	3,49	3,51	3,53	3,58	3,58	3,60	3,62	3,65	3,67	3,70
2,4	3,72	3,74	3,76	3,79	3,82	3,83	3,86	3,88	3,91	3,92

Продолжение

Значение числа N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,5	3,95	3,98	4,00	4,02	4,04	4,07	4,10	4,12	4,14	4,17
2,6	4,19	4,22	4,24	4,26	4,29	4,31	4,34	4,36	4,39	4,41
2,7	4,44	4,47	4,49	4,51	4,54	4,56	4,59	4,61	4,64	4,66
2,8	4,69	4,71	4,74	4,76	4,79	4,81	4,84	4,86	4,89	4,91
2,9	4,94	4,96	4,99	5,02	5,05	5,07	5,09	5,12	5,15	5,17
3,0	5,20	5,22	5,25	5,28	5,30	5,33	5,35	5,38	5,40	5,43

Таблица 2

Значения чисел N, возведенных в степень 2/3

Значение чисел N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,9	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99
0,8	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,92
0,7	0,78	0,80	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85	0,85
0,6	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,78
0,5	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,68	0,69	0,70
0,4	0,54	0,55	0,57	0,58	0,58	0,60	0,60	0,61	0,62	0,62
0,3	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,53
0,2	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
0,1	0,22	0,23	0,24	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,33
1,0	1,00	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06
1,1	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
1,2	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19
1,3	1,19	1,20	1,20	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25
1,4	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,28	1,29	1,29	1,30	1,30
1,5	1,31	1,32	1,32	1,33	1,33	1,34	1,34	1,35	1,35	1,36
1,6	1,37	1,37	1,38	1,39	1,39	1,40	1,40	1,41	1,41	1,42
1,7	1,42	1,43	1,44	1,44	1,44	1,45	1,45	1,46	1,46	1,47
1,8	1,48	1,49	1,49	1,50	1,50	1,51	1,51	1,52	1,52	1,53
1,9	1,53	1,54	1,55	1,55	1,56	1,56	1,57	1,57	1,58	1,58

Продолжение

Значение чисел N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,0	1,59	1,59	1,60	1,61	1,61	1,62	1,62	1,62	1,63	1,64
2,1	1,64	1,65	1,65	1,66	1,66	1,67	1,67	1,68	1,68	1,69
2,2	1,69	1,70	1,70	1,71	1,71	1,72	1,72	1,73	1,73	1,74
2,3	1,74	1,75	1,75	1,76	1,76	1,77	1,77	1,78	1,78	1,79
2,4	1,79	1,80	1,80	1,81	1,81	1,82	1,82	1,83	1,83	1,84
2,5	1,84	1,85	1,85	1,86	1,86	1,87	1,87	1,88	1,88	1,89
2,6	1,89	1,90	1,90	1,91	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93	1,93
2,7	1,94	1,95	1,95	1,95	1,96	1,96	1,97	1,98	1,98	1,98
2,8	1,99	1,99	1,99	2,00	2,01	2,01	2,02	2,02	2,02	2,03
2,9	2,03	2,04	2,04	2,05	2,05	2,06	2,06	2,07	2,07	2,08
3,0	2,08	2,09	2,09	2,09	2,10	2,10	2,11	2,11	2,12	2,12

Вспомогательные таблицы значений величин, используемых при определении характеристик режима твердения цементных материалов

Таблица 1

Средние значения p_{10} и p_{σ_0} в зависимости от коэффициента уплотнения бетонной смеси

Коэффициент уплотнения бетонной смеси $K_у$	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
Средние значения p_{10}, МПа	0,25	0,24	0,22	0,20	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15
Средние значения p_{σ_0}, МПа	0,15	0,14	0,12	0,10	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05

Таблица 2

Зависимость поверхностного натяжения воды и давления её насыщенных паров от температуры

Температура, °С	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Поверхностное натяжение σ_T, Дж/см^2 ($\sigma_T \times 10^{-6}$)	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,4	6,3	6,1	5,9
Давление насыщенных паров воды p_2 (T_t), МПа ($p_2 \times 10^{-3}$)	1,2	2,4	4,2	7,4	12,4	20	31,4	47,5	70	100

Пример определения состава и характеристик режима тепловой обработки бетона

Исходные данные: цемент вновь поступивший (алитовый, $\gamma_ц = 3{,}1$ г/см^3), заполнители: щебень гранитовый, песок кварцевый (водопоглощение щебня 1 %, песка 0,5 %), максимально возможная устойчивая температура при тепловлажностной обработке (ТВО) 80 °С; подвижность бетонной смеси обеспечивает степень уплотнения $K_у = 0{,}98$; в производстве имеют две группы тепловых камер с различными циклами работы (длительность режима ТВО первой группы не может превышать 20 ч, а второй — 10 ч); лаборатория располагает двумя контрактометрами КД-02 с подготовленными модельными смесями и объемами воздуха в сосудах 100 см^3.

Требуется:

1. Установить оптимальную продолжительность тепловой обработки бетона для первой группы камер при скоростях подъема и снижения температуры 20 °С/ч.
2. Обеспечить прочность бетона на одноосное сжатие после тепловой обработки (независимо от ее длительности) 20 и 30 МПа, а к сроку 28 суток 30 и 40 МПа.
3. Установить возможность обеспечения требуемых значений прочности бетона двумя составами.

Определение.

1. Приготавливают замес бетонной смеси объемом 4 л при $W/C = 0{,}4$ и расходе на 1 л цемента 400 г. Формуют два образца куба размером 100×100×100 мм и уплотняют бетонную смесь в двух стаканах контрактометров. Образцы (в лабораторной камере) и смесь в загерметизированных стаканах (в контрактометрах) выдерживают одновременно в течение 2 ч, при температуре 20 °С.
2. Осуществляют одновременно начало теплового режима в обоих контрактометрах и камере. Температуру повышают со скоростью 20 °С/ч в течение 3 ч. В одном из контрактометров и камере осуществляют неоптимальный 10-часовой режим ТВО (длительность изотермии составляет 4 ч, охлаждения 3 ч); во втором контрактометре изотермию продолжают до наступления $\tau_{опт}$ (см. п. 5.4.2.1), после чего осуществляют охлаждение также в течение 3 ч.

После завершения первого (неоптимального) режима испытывают оба образца-куба на сжатие (определяют R_0), регистрируют соответствующее значение Δp_0 и Δp_1; на первом контрактометре продолжают измерять кинетику контракции в нормальных условиях еще в течение 10 ч и регистрируют Δp_1, Δp_2, $\Delta p_1'$, $\Delta p_2'$ (см. п. 5.2.1.5).

К моменту завершения второго режима (к концу охлаждения) регистрируют $\Delta p_{опт}$.

Получают следующие результаты:

$R_0 = 22{,}0$ МПа, $\Delta p_0 = \Delta p_1 = 54$ см, $\Delta p_2 = 57$ см, $\Delta p_1' = 0{,}5$ см, $\Delta p_2' = 0{,}4$ см; $\tau_1 = 13$ ч, $\tau_2 = 21$ ч, $\tau_{опт} = 7$ ч, $\Delta p_{опт} = 61$ см.

3. Определяют m, $\Delta\tau$, ΔV_1, ΔV_{28} и $\Delta V_{опт}$ (см. пп. 5.1.1.5—5.1.1.7)

$$m = \frac{4}{\frac{57}{0{,}4} - \frac{54}{0{,}5}} = 0{,}12;$$

$$\Delta\tau=\frac{21-13\left(\frac{57}{54}\right)^{\frac{1}{0,12}}}{\left(\frac{57}{54}\right)^{\frac{1}{0,12}}-1}=3 \text{ сут};$$

$$\Delta V_{\text{опт}}=\frac{61\cdot 100}{980-61}=6,6 \text{ см}^3;$$

$$\Delta V_1=\frac{54\cdot 100}{980-54}=5,8 \text{ см}^3;$$

$$\Delta V_{28}=5,8\left(\frac{28+3}{\frac{13}{24}+3}\right)^{0,12}=7,6 \text{ см}^3.$$

Так как значения ΔV_1, $\Delta V_{\text{опт}}$ и ΔV_{28} получены для объема 0,5 л, то для расчетного объема смеси 1 л их увеличивают вдвое, т. е.: $\Delta V_1=11,6$ см^3; $\Delta V_{\text{опт}}=13,2$ см^3; $\Delta V_{28}=15,2$ см^3.

4. Определяют водоцементное отношение, обеспечивающее требуемые значения прочности бетона после ТВО и к сроку 28 сут:

а) при неоптимальном режиме ТВО; применяют формулу (24) $R_б=20$ МПа

$$W=\frac{400\cdot 0,4+\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}}{(20/22)^{2/3}}-\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}=173 \text{ см}^3;$$

$$W/C=173/400=0,43;$$

$$R_б=30 \text{ МПа};$$

$$W=\frac{400\cdot 0,4+\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}}{(30/22)^{2/3}}-\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}=123 \text{ см}^3;$$

$$W/C=123/400=0,31.$$

К сроку 28 сут после ТВО применяют формулу (23); $R_б=30$ МПа;

$$W=\frac{15,2\left(400\cdot 0,4+\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}\right)}{11,6(30/22)^{2/3}}-\frac{15,2}{0,1\cdot 3,1}=162 \text{ см}^3;$$

$$W/C=162/400=0,405;\ R_б=40 \text{ МПа};$$

$$W=\frac{15,2\left(400\cdot 0,4+\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}\right)}{(40/22)^{2/3}}-\frac{15,2}{0,1\cdot 3,1}=125 \text{ см}^3;$$

$$W/C=125/400=0,31;$$

б) при оптимальном режиме ТВО.

После ТВО применяют формулу (23); $R_б=20$ МПа;

$$W=\frac{13,2\left(400\cdot 0,4+\frac{11,6}{0,1\cdot 3,1}\right)}{(20/22)^{2/3}}-\frac{13,3}{0,1\cdot 3,1}=199 \text{ см}^3;$$

$$W/C=199/400=0,5;$$

$R_б$=30 МПа;

$$W=\frac{13{,}2\left(400\cdot 0{,}4+\frac{11{,}6}{0{,}1\cdot 3{,}1}\right)}{11{,}6(30/22)^{2/3}}-\frac{13{,}2}{0{,}1\cdot 3{,}1}=144 \text{ см}^3;$$

$$W/C=144/400=0{,}36.$$

К сроку 28 сут после ТВО, так как ΔV_{28}=7,6 см³ для $R_б$ =30 МПа и $R_б$=40 МПа значения W/C принимают теми же, что и по п. 4*а*, т. е. соответственно 0,405 и 0,31.

5. При неоптимальном режиме ТВО заданные значения прочности бетона после ТВО и к сроку 28 сут можно обеспечить двумя составами с W/C=0,31 и 0,405. В последнем случае дополнительные отклонения прочности от требуемой не превысят 3,5 %.

При оптимальном режиме ТВО требуемые значения прочности можно обеспечивать четырьмя составами с W/C, равными 0,5 и 0,36; 0,405 и 0,31.

Окончательное решение: для обеспечения требуемой прочности бетона после ТВО применяют оптимальный режим и водоцементное отношение 0,5 и 0,36, а к сроку 28 сут — неоптимальный режим и водоцементное отношение 0,405 и 0,31.

6. Применение оптимального режима ТВО позволяет экономить цемент. Для обеспечения необходимой подвижности бетонных смесей при W/C=0,31 и W/C=0,36 потребовалось воды 210 см³ и 200 см³ на 1 л, а при W/C=0,42 и 0,5 только 160 см³ на 1 л. Расходы цемента на 1 л смеси с учетом этого будут следующими:

при W/C=0,31 C=210/0,31=675 г/л;
при W/C=0,36 C=200/0,36=612 г.
Экономия цемента 675—612=63 г, т. е. 9,3 %;
при W/C=0,42 C=160/0,405=380 г;
при W/C=0,5 C=160/0,5=320 г.
Экономия цемента 380—320=60 г, т. е. 15,8 %.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Государственная система обеспечения единства измерений

Методика определения характеристик цементных материалов на дифференциальных контрактометрах

МИ 1353—86

Редактор *Н. А. Еськова*
Технический редактор *М. И. Максимова*
Корректор *Р. Н. Корчагина*
Н/К

Сдано в наб. 06.01.87 Подп. в печ. 01.04.87 Т—01500 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная. Печать высокая 3,0 усл. п. л. 3,125 усл. кр.-отт. 2,99 уч.-изд. л. Тир. 3000 Заказ Изд. № 9386/4 Цена 20 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП, Новопресненский пер., 3.
алужская типография стандартов, ул. Московская, 256. Зак. 50

gost.e-ecolog.ru