ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

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

МЕТОДИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТРАКЦИОННОГО ОБЪЕМА

МИ 84—76

ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
Москва — 1977

РАЗРАБОТАНА
Всесоюзным научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)

Директор **В. К. Коробов**
Руководитель темы и исполнитель **А. И. Марков**

НИИ АЭРОПРОЕКТ

Исполнитель **Л. А. Сильченко**

ПОДГОТОВЛЕНА К УТВЕРЖДЕНИЮ сектором госиспытаний и стандартизации **ВНИИФТРИ**

Руководитель сектора **И. И. Турунцова**
Исполнитель **И. Ш. Генфон**

УТВЕРЖДЕНА Научно-техническим советом Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) 23 апреля 1975 г., протокол № 2

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

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

МЕТОДИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТРАКЦИОННОГО ОБЪЕМА

МИ 84—76

МОСКВА—1977

Настоящая методика предназначена для непрерывного и экспрессного определения характеристик структуры бетона, раствора и цементного камня (поровые объемы, количество химически связанной воды, степень гидратации цемента и т. д.) и их пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение в процессе твердения при температуре до 100°С на основе измерений контракционного объема дифференциальным методом.

Указанная методика пригодна как для производственных, так и для исследовательских целей. К числу областей ее применимости относятся: направленное структурообразование цементных материалов, прогнозирование их основных свойств и метрологическое обеспечение производства продукции из цементных материалов. В частности, по измеренным характеристикам структуры производится аттестация стандартных образцов свойств (прочности, плотности и т. д.) для градуировки специальных средств измерения, применяемых в контроле, в том числе неразрушающем, свойств строительной продукции. Образцы, аттестованные в качестве стандартных, являются основой построения на требуемом уровне точности корреляционных зависимостей и аттестации специальных образцовых средств, обеспечивающих проведение государственных испытаний и поверку рабочих средств измерений строительного назначения.

©Издательство стандартов, 1977

УДК 620.1.08.666.94/98

МЕТОДИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТРАКЦИОННОГО ОБЪЕМА

МИ 84—76

1. ПРИНЦИПЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ КИНЕТИКИ КОНТРАКЦИИ

Метод предполагает использование модельной смеси, компенсирующей тепловое расширение исследуемого материала, а также парциальное давление паров воды при изменении температуры.

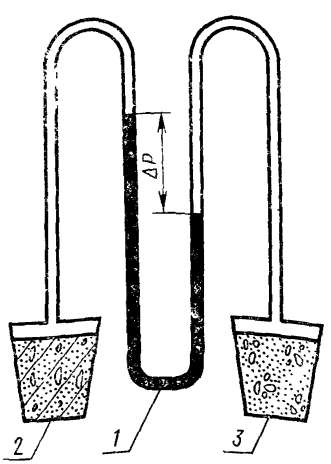
Исследуемый материал и его модель помещаются в герметизируемые сосуды.

Принципиальная схема прибора, обеспечивающего измерение кинетики контракции дифференциальным методом достаточно проста (черт. 1.).

Два герметизируемых сосуда соединяются в замкнутую систему жидкостным *U*-образным манометром *1*. Один из сосудов содержит исследуемый материал *2*, а второй его модель *3*.

Компенсация моделью теплового расширения материала и парциального давления паров воды позволяет регистрировать разность давления Δp (см. жидкост. ст.) в манометре, как результат разрежения воздуха в сосуде с цементным материалом, вызванного контракционным эффектом — сокращением абсолютного объема материала при гидратационных превращениях.

Принципиальная схема дифференциального контрактометра



Черт.1

Так как система из двух сосудов замкнута, то изменение атмосферного давления в процессе твердения не сказывается на разности давлений Δp.

В качестве модельной смеси наиболее предпочтительно использовать исследуемый материал в исходном состоянии (смесь), заменив в нем по абсолютному объему вяжущее на тонкомолотый кварцевый песок без примесей и одинаковой дисперсностью.

В производственных условиях допустимо применение не тонкомолотого, а Вольского или речного (без примесей) песка. Модельная смесь, затворенная водой, должна быть инертной. Для этого она предварительно подвергается тепловой обработке в сосуде при температуре 80°С не менее 5 ч.

Таким образом, измерение кинетики контракционного объема дифференциальным методом состоит в непрерывном измерении разности давлений Δp между исследуемым и модельным материалами и построении зависимости типа $\Delta p = f(\tau)$, где τ — время (часы, сутки).

Измерения производятся при различных температурах (до +100°С) и не ограничиваются объемом исследуемого материала.

Ниже дается описание дифференциального контрактометра, методика его подготовки к работе и проверке, методика измерения контракционного объема и определения на этой основе ряда характеристик структуры и пределов прочности цементных материалов.

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ КОНТРАКТОМЕТР

2.1. Конструкция прибора

Прибор (черт. 2) состоит из следующих основных блоков:

герметизируемых сосудов со стаканами *1* для исследуемого материала и его модели (общий вид сосуда приведен на черт. 3);

термостатов *2* — тепловые камеры для обеспечения заданной температуры в диапазоне 20—100°С с охлаждающей системой: резервуар для воды *3*, краны регулировочные *4*, напорная линия *5*, сливная линия *6*, уровень воды в термостатах *7*;

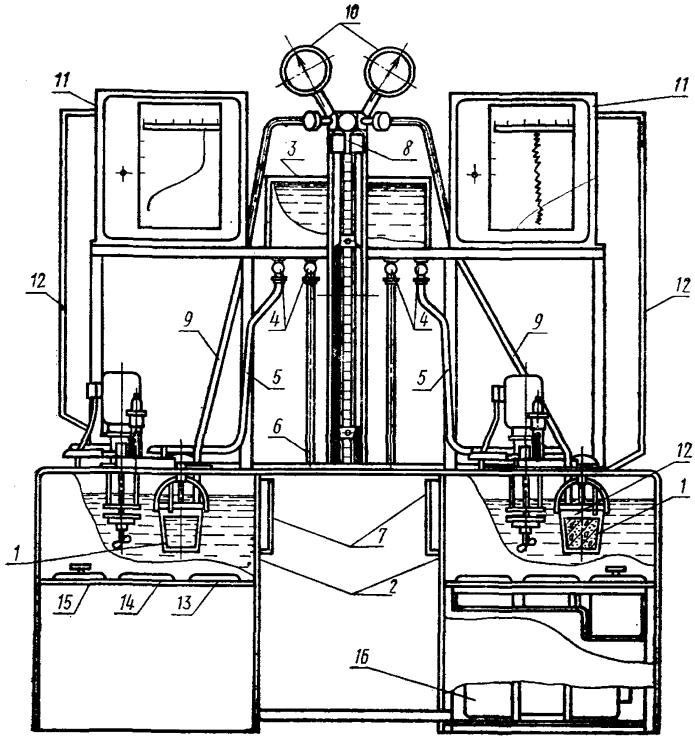
комбинированного дифференциального жидкостного манометра *8* с соединительными шлангами *9* и мановакуумметрами *10* (этот блок предназначен для измерения разности давлений Δp между сосудами, а также избыточного давления или разрежения в каждом из сосудов);

комплекта приборов для измерения, записи и регулирования температуры в герметизируемых сосудах с материалом и его моделью;

потенциометров самопишущих *11* и термопар *12*;

комплекта приборов для измерения, регулирования и задания

Конструктивная схема дифференциального контрактометра

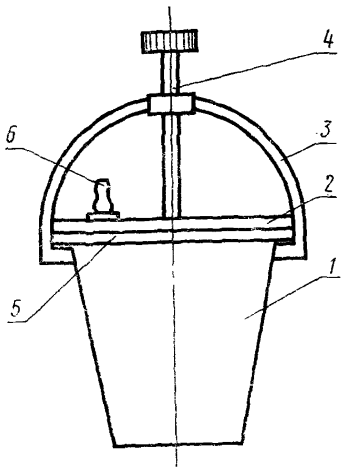


Черт. 2

мощности электропитания, подводимого к тепловым камерам (термостатам): амперметры *13*, вольтметры *14*, автотрансформаторы *15* и стабилизаторы напряжения *16*.

Упрощенный вариант (черт. 4) дифференциального контрактометра, который может быть использован в производстве при контроле твердения бетона в пропарочных камерах, состоит из комбинированного дифманометра и двух сосудов со стаканами. В пропарочную камеру помещают только сосуды.

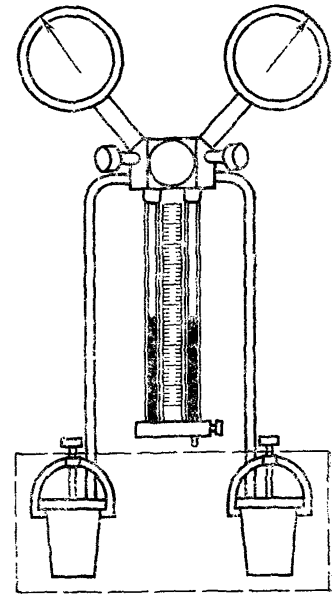
Общий вид сосуда



1—сосуд; *2*—крышка; *3*—крепежная скоба; *4*—упорный винт; *5*—прокладка; *6*—штуцер

Черт. 3

Конструктивная схема упрощенного дифференциального контрактометра



Черт. 4

2.2. Электрическая схема прибора

Электрическая и электронная части прибора предназначены для электропитания термостатов, синхронизации их работы и поддержания равенства температур в сосудах с материалом и его моделью.

На черт. 5 приведена электросхема прибора, которая состоит из:

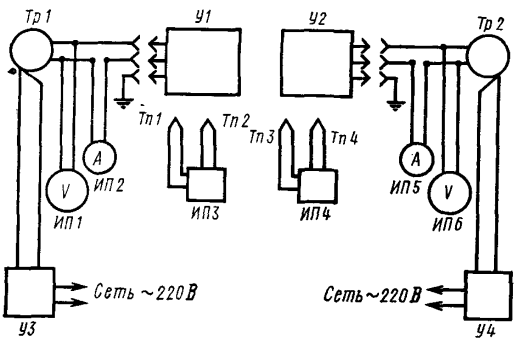
стабилизаторов напряжения *У3*, *У4*;
ультратермостатов УТ-15 — *У1*, *У4*;
вольтметров *ИП1*, *ИП6*;

амперметров *ИП2*, *ИП5*;
потенциометров автоматических *ИП3*, *ИП4*;
лабораторных автотрансформаторов *Тр1*, *Тр2*;
термопар ХК Тп1, Тп2, Тп3, Тп4.

2.3. Некоторые характеристики прибора

Дифференциальный контрактометр работает при температуре и влажности окружающей среды соответственно от +5 до +40°С и от 10 до 80%. Максимальная мощность нагревателей термостатов составляет 1000 Вт. Питание термостатов и потенциометров осуществляется переменным напряжением 220 В. Емкость стаканов составляет 1000 см³. Поддержание равенства температур в сосудах осуществляется с погрешностью ±0,15°С в диапазоне температур 20—100°С.

Принципиальная электросхема дифференциального контрактометра



Черт. 5

С целью повышения чувствительности дифманометра и расширения шкалы разности давлений, он наполняется манометрической жидкостью — дибутилфталатом. Чувствительность дифманометра составляет 13.3 Па при максимальных значениях: разности давлений 0,013 МПа и давления в сосудах (по мановакуумметрам) 0,1 МПа.

Максимальное значение разности уровней жидкости в дифманометре составляет 750 мм.

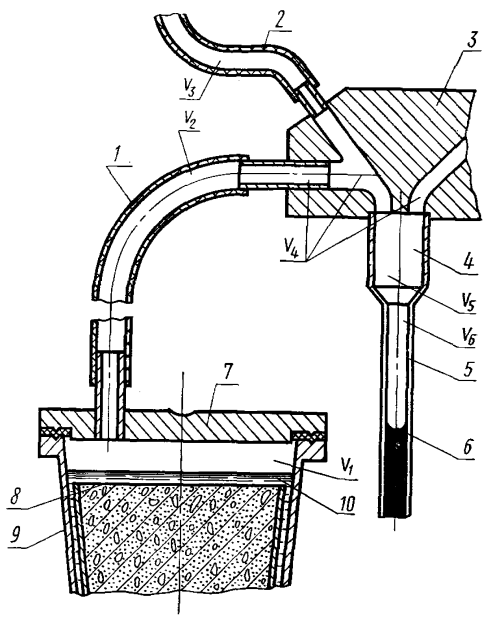
Мощность нагревателей можно регулировать вручную от 100 до 1000 Вт, что позволяет заранее устанавливать то ее значение, которое обеспечивает заданную скорость подъема температуры в термостатах до изотермической стадии прогрева с погрешностью ±0,5 град/ч.

Регулирование температуры в сосудах производится с целью обеспечения равенства температур смесей газов (паров воды и

воздуха) в каждом из них. Регулируемым определен сосуд с модельной смесью, что позволяет корректировать температуру модели с учетом тепла экзотермии, выделяющегося при гидратации вяжущего в исследуемом материале.

Важной характеристикой дифференциального контрактометра является объем воздушной подушки $V_в$ в обеих ветвях прибора. Равенство $V_в$ над исследуемым материалом и его моделью является обязательным условием, которое необходимо выполнять при проведении измерений кинетики контракции.

Распределение свободных объемов в дифференциальном контрактометре



1—соединительный вакуумный шланг; *2*—трубка мановакуумметра; *3*—головка дифманометра; *4*—резервная камера; *5*—капилляр дифманометра; *6*—уровень жидкости в дифманометре; *7*—крышка сосуда; *8*—уровень смеси; *9*—сосуд; *10*—вода

Черт. 6

Объем воздушной подушки в каждой ветви (черт. 6) равен сумме объемов, не заполненных материалом (моделью) и манометрической жидкостью:

$$V_в = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7. \qquad (1)$$

Все объемы — слагаемые и являются константами, за исключением V_1 и V_7.

$$V_1 = V_1' - V_0,$$

где V'_1 — константа — свободный объем герметизируемого сосуда, в котором содержится стакан, наполненный смесью, см^3;

V_0 — объем воды, которая наливается в сосуд с целью улучшения синхронизации нагрева обеих подушек, создавая над поверхностью смеси слой высотой 3 мм для бетона (раствора) и 5 мм для цементного камня.

Объем воздуха, вовлеченного на стадии уплотнения исследуемого материала V_7, определяется по зависимости:

$$V_7 = (1 - K_у) V_m,$$

где V_m — объем смеси, см^3;

$K_у$ — коэффициент уплотнения бетонной (цементной) смеси.

При объеме стаканов 1000 см^3 рекомендуется обеспечивать значение $V_в$ в пределах 300—400 см^3.

2.4. Проверка прибора

Проверка прибора производится не реже одного раза в месяц. При этом имеется в виду, что потенциометры, стабилизаторы, вольтметры, амперметры, автотрансформаторы, контактные термометры, термопары, мановакуумметры и термостаты поверяются в установленные для них сроки.

Поэтому проверка прибора состоит только из трех этапов: проверка системы «сосуды — соединительные шланги — дифманометр» на герметичность при комнатной температуре; совмещенная проверка на герметичность указанной системы и синхронность нагрева воздушных подушек в сосудах при заданном режиме нагрева; проверка на наличие конденсата в шлангах дифманометра.

Проверка на первом этапе осуществляется следующим образом. Вначале проверяется дифманометр с вакуумными шлангами (черт. 7). Для этого один из шлангов *1*, одетый на штуцер *2*, перекрывается зажимом, а второй соединяется с вакуумнасосом. Вентилями *3* перекрывается сообщение дифманометра с атмосферой, а уравнительным вентилем *4* трубки капилляры *5* дифманометра соединяются между собой.

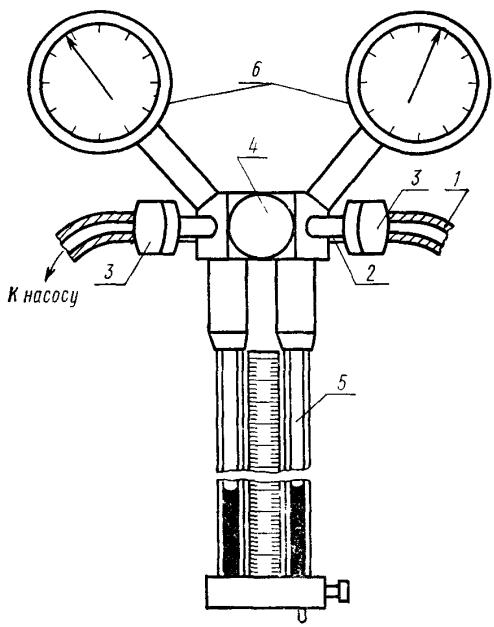
Вакуумнасосом создается избыточное давление до 0,15 МПа, а разрежение до $1 \cdot 10^{-4}$ МПа (контроль по мановакуумметрам *6*). После создания давления или разрежения второй шланг перекрывается зажимом, а уравнительным вентилем перекрывается сообщение между трубками манометра.

Если в течение одного часа разность уравнений жидкости в дифманометре не превысит 5 мм, считается, что герметичность дифманометра обеспечена.

Аналогичными приемами осуществляется проверка на герметичность системы «сосуды — соединительные шланги — дифманометр».

На втором этапе производится совмещенная проверка при повышенных температурах, которая позволяет также осуществить выбор мощности нагревателей, обеспечивающих заданную скорость подъема температуры, если отсутствует программный регулятор.

Дифференциальный манометр с мановакуумметрами



Черт. 7

Для этой цели оба стакана наполняются дистиллированной водой с погрешностью не выше ±0,5% и герметизируется в сосудах. Допускается разность температуры воды в стаканах не выше ±0,1°С, а в термостатах не выше ±0,2°С. Контактные термометры термостатов должны быть выставлены точно на заданную температуру изотермии, например, +80°С, а разность уровней воды в термостатах не должна превышать 2—3 мм.

В процессе нагрева воды в сосудах в течение заданного режима производится отсчет разности давлений в дифманометре и строится график «собственного хода» прибора (черт. 8, кривая *1*), автоматически ведется запись разности температур в сосудах и температуры в сосуде, предназначенном для исследуемого материала. Результаты проверки на втором этапе считаются положительными, если на протяжении всего режима прогрева максимальная разность давлений в дифманометре не превышает 30 см дб. ст., а разность температур — не более ±0,15°С.

Полученный график при этом используется при построении действительной кривой кинетики контракции в цементном материале, подвергнутом нагреву по данному режиму.

Обнаружение конденсата в шлангах и верхней головке дифманометра и его удаление осуществляются путем продувки с помощью насоса. Продувка производится поочередно по каждой из ветви при открытом уравнительном вентиле и перекрытых боковых вентилях. Целесообразно при продувке ограничивать посредством зажимов полезное сечение шлангов с тем, чтобы в системе создавалось избыточное давление около 0,05 МПа.

3. ИЗМЕРЕНИЕ КИНЕТИКИ КОНТРАКЦИИ И КОНТРАКЦИОННОГО ОБЪЕМА

3.1. Подготовка к проведению измерений

Прибор должен быть подключен к электросети и водоснабжению (резервуар подключается посредством двух шлангов).

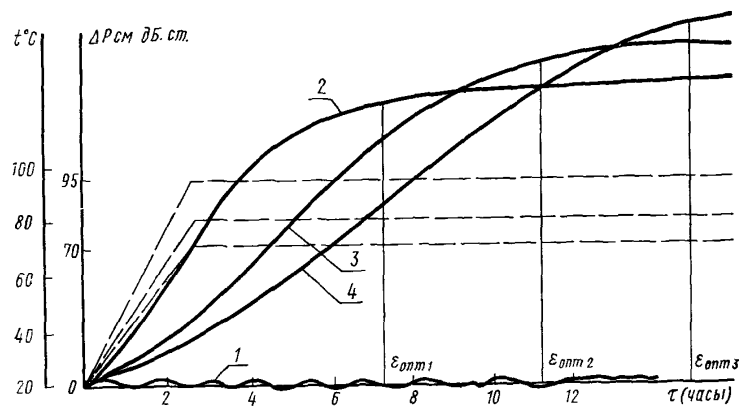
Вначале необходимо открыть все вентили верхней головки дифманометра и снять крышки с сосудов (см. черт. 3). Стаканы покрываются смазкой для предотвращения сцепления материала с их стенками. Один из стаканов наполняется модельной смесью, подвергается вибрации и вставляется в сосуд. Второй стакан наполняется исследуемой смесью, которая также уплотняется вибрированием. По завершению вибрирования определяется степень уплотнения исследуемой смеси. По данным о степени уплотнения смеси корректируется объем модельной смеси (уменьшается на $V_m(1-K_y)$ см^3). Стакан с исследуемой смесью вставляется во второй сосуд. В оба сосуда доливается одинаковое количество воды V_0 (см. п. 2.3).

Перед герметизацией сосудов измеряется температура обеих смесей, а также атмосферное давление (в см дб. ст.). Герметизация сосудов осуществляется в следующем порядке: перекрываются два больших вентиля, связанные с сосудами, с помощью скобы и упорного винта герметизируются стыки «крышка—сосуд», перекрывается уравнительным вентилем сообщение между трубками дифманометра и сосуды со смесями ставят в термостаты. Включаются термостаты, самопишущие потенциометры и выставляется требуемая мощность нагревателей.

3.2. Проведение измерений

В процессе твердения бетона или другого цементного материала измерение кинетики контракции сводится к измерению разности давлений в дифманометре. Отсчет разности производится визуально по линейной шкале с визирами через равные промежутки времени, устанавливаемые в соответствии с длительностью твердения. По этим данным строится график кинетики контракции в виде функции $\Delta p_i = f(\tau_i)$ (черт. 8). При построении графика учитывается график «собственного хода» прибора. Здесь же наносится график температурного режима в виде функции $t_i = f(\tau_i)$.

Кинетика контракции при различных температурах изотермии



1—кривая «собственного хода» контрактометра; *2*, *3*, *4*—кривые кинетики контракции при температуре изотермии соответственно: 95; 80; 70°С.

Черт. 8

Измерение контракционного объема ΔV_i осуществляется косвенно, то есть его искомое значение находят по зависимости между контракционным объемом и величинами, подвергаемыми прямым измерениям:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta p_i V_в}{p \frac{T_1}{T_0} - \Delta p_i} + H_i S, \qquad (2)$$

где Δp_i — разность давлений в дифманометре, см дб. ст.;

p — атмосферное давление, см дб. ст.;

H_i — разность уровней дибутилфталата в дифманометре, см;

S — площадь внутреннего сечения трубки дифманометра, см^2;

T_0, T_i — температура (по Кельвину) в сосудах в начале опыта и к требуемому моменту времени;

$V_в$ — объем воздушной подушки в момент герметизации сосудов, см³.

Переход от изотермической стадии режима тепловой обработки к охлаждению осуществляется включением системы охлаждения термостатов таким образом, чтобы напор воды охлаждения был больше в термостате с модельной смесью. При этом сохраняются включенными нагреватели этого термостата, а нагреватели термостата с исследуемыми материалом отключаются. Снижение температуры в термостатах производится под контролем регулирующего потенциометра или программного устройства.

После завершения измерения кинетики контракции отключается электропитание и водоснабжение прибора, открываются последовательно уравнительный и боковые вентили. Сосуды извлекаются из термостатов, снимаются крышки, а стаканы, благодаря их конусности, легко освобождаются от модельной смеси и исследованного материала.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

4.1. Определение характеристик структуры

а) Количество химически связанной воды $m_{W'i}$ в долях от исходной массы цемента C в материале, то есть $L_i=\frac{m_{W_i'}}{C}$:

$$L_i=\frac{\Delta V}{C(1/\gamma_W-1/\gamma_{W'})}, \qquad (3)$$

где C — масса цемента в исследуемом объеме материала, г;

γ_W — плотность воды в свободном состоянии, г/см³;

$\gamma_{W'}$ — условная средняя плотность химически связанной воды, г/см³.

В табл. 1 приведены значения $\gamma_{W'}$, установленные для цементов различных типов, гидратирующихся в диапазоне температур 10—100°С.

Таблица 1

Средние значения параметров переупаковки (при $t\leqslant 100$°С) и констант гидратации (при $t=20$°С и различных значениях W/C)

Тип цемента	$t\leqslant 100$°С		$W/C\leqslant 0{,}4$		$W/C>0{,}4$	
	$\gamma_{W'}$, (г/см³)	$1/\gamma_W-1/\gamma_{W'}$, $\left(\frac{см^3}{г}\right)$	L_1	m	L_1	m
Алюминатный	1,45	0,31	0,12	0,125	0,132	0,121
Алюминатно-алитовый	1,4	0,28	0,093	0,148	0,106	0,137
Обычный (алитовый)	1,35	0,26	0,076	0,164	0,083	0,160
Белитовый, ШПЦ	1,3	0,23	0,039	0,21	0,043	0,176

б) Общий поровый объем V_i материала

$$V_i = V_m(1-K_y)+C(W/C-L_i/\gamma_{W'}), \qquad (4)$$

где W/C — остаточное водоцементное отношение (за вычетом отслаивания воды и водопоглощения заполнителями), см³/г.

в) Абсолютный объем V_{ni} новообразований (кристаллогидратов):

$$V_{ni}=CL_if, \qquad (5)$$

где f — константа для каждого типа цемента и температуры его гидратации (см. табл. 2):

$$f=(\gamma_{W'}+\gamma_C L')/L'\gamma_W\gamma_C,$$

здесь L' — среднее соотношение по массе между всей химически связанной водой и совокупностью клинкерных минералов цемента в кристаллогидратах (для цементов, гидратированных при $t\leqslant 100$°С значение L' принимается равным 0,4);

γ_C — плотность цементного клинкера, г/см³.

Таблица 2

Значения констант f, A и φ при температуре гидратации до 100°С и в зависимости от плотности цементного клинкера γ_C (г/см³)

Тип цемента		$\gamma_C=2{,}85$ $\varphi=1{,}14$	$\gamma_C=2{,}90$; $\varphi=1{,}16$	$\gamma_C=3{,}0$; $\varphi=1{,}2$	$\gamma_C=3{,}1$; $\varphi=1{,}24$	$\gamma_C=3{,}2$; $\varphi=1{,}28$
Алюминатный	f	1,582	1,55	1,524	1,495	1,47
	A	1,308	1,295	1,285	1,273	1,264
Алюминатно-алитовый	f	1,607	1,575	1,549	1,520	1,495
	A	1,342	1,330	1,320	1,308	1,298
Обычный алитовый	f	1,632	1,60	1,574	1,550	1,520
	A	1,377	1,365	1,355	1,345	1,333
Белитовый, ШПЦ	f	1,662	1,63	1,604	1,575	1,55
	A	1,419	1,406	1,397	1,385	1,375

г) Поровый объем V'_{ni} сростка кристаллогидратов:

$$V'_{ni}=0{,}39fCL_i. \qquad (6)$$

д) Объем V_{ki} капиллярных пор в материале:

$$V_{ki}=C(W/C-AL_i), \qquad (7)$$

где A — константа для каждого типа цемента и температуры его гидратации (см. табл. 2):

$$A=0{,}39f+1/\gamma_{W'},$$

4.2. Определение пределов прочности бетона на одноосное сжатие (растяжение)

В основу определения пределов прочности положены результаты контрактометрической оценки L_i и следующая зависимость:

$$R_i = R_0 \left[\frac{L_i \left(\frac{W_0 + V_0}{C_0} + \frac{L_0}{L' \gamma_C} \right)}{L_0 \left(\frac{W_i + V_i}{C_i} + \frac{L_i}{L' \gamma_C} \right)} \right]^{\alpha}, \qquad (8)$$

где R_i — искомый предел прочности на одноосное сжатие (растяжение), МПа;

R_0 — предел прочности, полученный испытанием образцов бетона одного произвольного состава, изготовленного из тех компонентов и по той технологии, которые используются при изготовлении бетона с пределом прочности R_i, МПа;

V_0, V_i — объемы вовлеченного воздуха в бетонных смесях, которым соответствуют пределы прочности бетонов R_i и R_0, см^3;

α — показатель степени, равный $^3/_2$ для сжатия и 1 для растяжения.

В производственных условиях, когда коэффициент уплотнения бетонной смеси не ниже 0,98, возраст бетонов с пределами прочности R_i и R_0 одинаков, а водоцементное отношение сравниваемых бетонов находится в пределах $0{,}25 < W/C \leqslant 0{,}4$ или $0{,}4 < W/C < 1{,}0$, допустимы следующие упрощения.

Значениями V_i/C_i и V_0/C_0 можно пренебречь, $L_i = L_0 = L$, а зависимость (8) имеет вид:

$$R_i = R_0 \left(\frac{W_0/C_0 + L/L'\gamma_C}{W_i/C_i + L/L'\gamma_C} \right)^{\alpha}. \qquad (9)$$

При использовании обычного портландцемента и твердении бетона в нормальных условиях к сроку в 28 суток или после оптимальной тепловой обработки при температуре изотермии +80°С допустимо для целей практики значение параметра $L/L'\gamma_C$ в зависимости (9) принимать равным, соответственно, 0,12 и 0,1.

4.3. Определение водоцементного отношения, обеспечивающего получение бетона с требуемым пределом прочности на одноосное сжатие (растяжение)

Методику рекомендуется применять при обеспечении стабилизации факторов, то есть при постоянстве вида исходных компонентов бетона, технологии его изготовления и условий твердения.

Таблица 3

Значения чисел N, возведенных в степень $^3/_2$

Значение числа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,9	0,855	0,868	0,880	0,895	0,917	0,932	0,945	0,960	0,972	0,984
0,8	0,71	0,73	0,745	0,757	0,77	0,783	0,798	0,811	0,826	0,840
0,7	0,583	0,598	0,612	0,625	0,638	0,650	0,663	0,677	0,689	0,702
1.0,6	0,465	0,478	0,489	0,50	0,512	0,524	0,536	0,549	0,561	0,573
0,5	0,354	0,365	0,376	0,386	0,399	0,409	0,420	0,431	0,442	0,453
0,4	0,253	0,262	0,271	0,281	0,292	0,303	0,313	0,322	0,333	0,342
0,3	0,164	0,172	0,181	0,190	0,199	0,208	0,217	0,226	0,235	0,244
0,2	0,089	0,096	0,104	0,111	0,118	0,125	0,133	0,1411	0,149	0,157
0,1	0,032	0,037	0,042	0,047	0,052	0,058	0,064	0,070	0,075	0,080
0,09	0,0273	0,0276	0,028	0,0285	0,029	0,0294	0,0299	0,0305	0,031	0,032
0,08	0,0225	0,023	0,0235	0,024	0,0245	0,025	0,0255	0,0260	0,0265	0,027
0,07	0,0185	0,019	0,0195	0,0199	0,0204	0,0207	0,0210	0,0214	0,0217	0,022
0,06	0,0015	0,0153	0,0156	0,0160	0,0163	0,0166	0,0170	0,0173	0,0176	0,018
0,05	0,012	0,0122	0,0125	0,0128	0,0130	0,0133	0,0136	0,0140	0,0143	0,015
2.0,04	0,008	0,0083	0,0087	0,0089	0,0093	0,0096	0,0099	0,0105	0,011	0,0115
0,03	0,0052	0,0055	0,0057	0,0060	0,0063	0,0066	0,0068	0,0071	0,0074	0,0077
0,02	0,0028	0,003	0,0032	0,0035	0,0037	0,0040	0,0042	0,0045	0,0047	0,005
0,01	0,001	0,0013	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017	0,0020	0,0022	0,0024	0,0026

Примеры (см. табл.) 1. $N^{3/2}=0{,}63^{3/2}=0{,}5$ 2. $N^{3/2}=0{,}04^{6^{3/2}}=0{,}0099$

Таблица 4

Значения чисел N, возводимых в степень $^3/_2$

Значение числа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	1,000	1,015	1,030	1,045	1,060	1,076	1,091	1,107	1,122	1,138
1,1	1,153	1,167	1,185	1,201	1,218	1,233	1,249	1,266	1,282	1,298
1,2	1,313	1,331	1,347	1,364	1,381	1,397	1,414	1,431	1,449	1,466
1,3	1,483	1,500	1,517	1,534	1,551	1,568	1,586	1,603	1,621	1,639
1,4	1,656	1,674	1,692	1,710	1,728	1,747	1,765	1,782	1,801	1,819
1,5	1,837	1,856	1,874	1,893	1,911	1,930	1,949	1,967	1,986	2,005
1,6	2,023	2,043	2,062	2,081	2,100	2,119	2,139	2,158	2,177	2,197
1,7	2,217	2,236	2,256	2,276	2,295	2,315	2,335	2,355	2,375	2,395
1,8	2,415	2,435	2,456	2,476	2,496	2,516	2,537	2,557	2,578	2,598
1,9	2,619	2,640	2,661	2,682	2,702	2,723	2,744	2,765	2,786	2,807
2,0	2,828	2,850	2,871	2,892	2,914	2,935	2,956	2,978	3,000	3,004
2,1	3,043	3,065	3,086	3,109	3,130	3,152	3,163	3,197	3,218	3,241
2,2	3,262	3,285	3,308	3,330	3,353	3,375	3,397	3,419	3,442	3,465
2,3	3,489	3,511	3,534	3,557	3,581	3,603	3,624	3,648	3,672	3,695
2,4	3,718	3,740	3,763	3,789	3,817	3,835	3,859	3,882	3,905	3,929
2,5	3,954	3,978	4,000	4,023	4,044	4,067	4,097	4,121	4,143	4,167
2,6	4,193	4,217	4,242	4,264	4,290	4,314	4,338	4,362	4,388	4,413
2,7	4,436	4,468	4,486	4,512	4,536	4,560	4,586	4,609	4,636	4,660
2,8	4,686	4,709	4,736	4,761	4,786	4,811	4,836	4,862	4,886	4,913
2,9	4,939	4,964	4,989	5,024	5,045	5,067	5,092	5,118	5,145	5,170
3,0	5,196	5,222	5,248	5,275	5,300	5,327	5,353	5,379	5,396	5,431

Таблица 5

Значения чисел N, возведенных в степень $^2/_3$

Значение числа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,9	0,933	0,939	0,946	0,952	0,960	0,966	0,973	0,979	0,986	0,992
0,8	0,861	0,869	0,875	0,884	0,890	0,896	0,904	0,911	0,918	0,924
0,7	0,787	0,795	0,803	0,810	0,817	0,825	0,834	0,840	0,846	0,854
0,6	0,711	0,719	0,727	0,734	0,742	0,750	0,757	0,766	0,772	0,781
0,5	0,630	0,638	0,647	0,655	0,663	0,670	0,679	0,687	0,695	0,703
0,4	0,543	0,552	0,569	0,578	0,587	0,596	0,604	0,612	0,622	0,622
1.0,3	0,448	0,458	0,468	0,477	0,488	0,497	0,507	0,516	0,526	0,534
0,2	0,341	0,353	0,364	0,375	0,386	0,397	0,408	0,419	0,429	0,438
0,1	0,215	0,229	0,243	0,256	0,269	0,282	0,297	0,307	0,319	0,331
0,09	0,20	0,202	0,204	0,206	0,207	0,209	0,211	0,212	0,213	0,214
0,08	0,186	0,188	0,190	0,192	0,194	0,195	0,196	0,197	0,198	0,199
0,07	0,170	0,172	0,174	0,176	0,178	0,180	0,181	0,182	0,183	0,184
0,06	0,153	0,155	0,157	0,159	0,161	0,163	0,165	0,166	0,167	0,168
0,05	0,135	0,137	0,139	0,141	0,143	0,145	0,147	0,149	0,150	0,152
0,04	0,117	0,119	0,121	0,123	0,126	0,126	0,128	0,130	0,131	0,133
0,03	0,097	0,098	0,100	0,102	0,104	0,106	0,108	0,110	0,112	0,115
0,02	0,074	0,076	0,079	0,081	0,083	0,085	0,087	0,088	0,092	0,094
2.0,01	0,046	0,048	0,051	0,054	0,057	0,060	0,063	0,066	0,069	0,071
0,009	0,043	0,0435	0,0438	0,0441	0,0445	0,0448	0,045	0,0454	0,0457	0,046
0,008	0,040	0,0403	0,0406	0,0409	0,0412	0,0415	0,0418	0,421	0,0424	0,043
0,007	0,0369	0,037	0,0372	0,0376	0,0380	0,0383	0,0386	0,0390	0,0393	0,040
0,006	0,033	0,0333	0,0337	0,0340	0,0344	0,0348	0,0352	0,0356	0,0360	0,0363
0,005	0,0292	0,0296	0,030	0,0304	0,0308	0,0312	0,0315	0,0319	0,0323	0,0326
0,004	0,025	0,0254	0,0258	0,0262	0,0266	0,0270	0,0274	0,0278	0,0283	0,0287
0,003	0,021	0,0214	0,0219	0,0223	0,0227	0,0231	0,0235	0,0239	0,0243	0,0247
0,002	0,016	0,0165	0,0170	0,0175	0,0180	0,0185	0,0190	0,0195	0,020	0,0205
0,001	0,010	0,0106	0,0112	0,0118	0,0124	0,0130	0,0136	0,0142	0,0148	0,0154

Примеры (см. табл.) 1. $N^{2/3}=0,32^{2/3}=0,468$; 2. $N^{2/3}=0,017^{2/3}=0,066$.

Таблица 6

Значения чисел N, возведенных в степень $^2/_3$

Значение числа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	1,000	1,007	1,013	1,020	1,027	1,033	1,040	1,046	1,053	1,059
1,1	1,066	1,071	1,078	1,085	1,092	1,098	1,104	1,111	1,116	1,123
1,2	1,129	1,135	1,145	1,148	1,154	1,160	1,167	1,173	1,179	1,185
1,3	1,191	1,197	1,203	1,209	1,216	1,222	1,228	1,234	1,240	1,246
1,4	1,252	1,258	1,263	1,269	1,275	1,281	1,287	1,293	1,298	1,304
1,5	1,310	1,316	1,322	1,328	1,334	1,340	1,345	1,351	1,356	1,362
1,6	1,368	1,373	1,380	1,385	1,391	1,396	1,402	1,408	1,413	1,419
1,7	1,424	1,430	1,435	1,441	1,447	1,452	1,458	1,463	1,469	1,474
1,8	1,480	1,485	1,491	1,496	1,502	1,507	1,513	1,518	1,523	1,529
1,9	1,534	1,539	1,545	1,550	1,555	1,561	1,566	1,572	1,577	1,582
2,0	1,588	1,593	1,598	1,603	1,608	1,614	1,619	1,624	1,629	1,635
2,1	1,639	1,645	1,650	1,655	1,661	1,666	1,671	1,676	1,681	1,687
2,2	1,691	1,696	1,702	1,706	1,712	1,717	1,721	1,727	1,732	1,738
2,3	1,743	1,747	1,752	1,757	1,763	1,768	1,773	1,778	1,783	1,787
2,4	1,793	1,798	1,803	1,807	1,813	1,818	1,822	1,828	1,832	1,837
2,5	1,842	1,847	1,852	1,857	1,862	1,867	1,871	1,876	1,881	1,886
2,6	1,891	1,896	1,900	1,905	1,910	1,915	1,920	1,925	1,929	1,933
2,7	1,939	1,944	1,948	1,953	1,958	1,963	1,968	1,977	1,980	1,982
2,8	1,987	1,991	1,994	2,001	2,005	2,010	2,015	2,019	2,024	2,029
2,9	2,034	2,038	2,043	2,047	2,052	2,057	2,062	2,067	2,071	2,076
3,0	2,080	2,085	2,090	2,094	2,099	2,103	2,108	2,112	2,117	2,121

Для определения W_i/C_i, как и R_i, необходимо изготовить 3 образца-близнеца бетона произвольного состава, приняв его водоцементное отношение за W_0/C_0, и испытать их на прессе (разрывной машине) к сроку в 1—3 суток (при нормальном твердении) или после тепловой обработки.

Срок испытания одни сутки рекомендуется при использовании высокоалюминатных и быстротвердеющих цементов.

Рекомендуемое количество образцов допустимо, если коэффициенты уплотнения бетонных смесей и однородность распределения компонентов по объему одинаковы, а состав бетонов по массе компонентов выдержан с погрешностью ±1%. Одновременно с изготовлением образцов производятся наполнения сосудов дифференциального контрактометра и его запуск.

Полученных в результате испытаний и измерений результатов достаточно для расчета водоцементного отношения, обеспечивающего достижение бетоном любого из возможных для данной стабилизации факторов, пределов прочности.

Зависимость, по которой рассчитывается W_i/C_i, имеет общий вид:

$$W_i/C_i=\frac{L_i[(W_0+V_0)/C_0+L_0/L'\gamma_C\ ]}{L_0\ (R_i/R_0)^{1/\alpha}}-\frac{V_i}{C_i}-\frac{L_i}{L'\ \gamma_C}. \qquad (10)$$

Для расчетов в условиях производства данная зависимость несколько упрощается:

$$W_i/C_i=\frac{L_i[(W_0/C_0+L_0/\varphi)}{L_0\,(R_i/R_0)^{1/\alpha}}\ -\frac{L_i}{\varphi}, \qquad (11)$$

где $\varphi=L'\gamma_C$ (см. табл. 2).

При условиях, установленных для зависимости (9), расчет W_i/C_i предельно упрощается:

$$W_i/C_i=\frac{W_0/C_0+L/\varphi}{(R_i/R_0)^{1/\alpha}}-\frac{L}{\varphi}. \qquad (12)$$

С целью ускорения расчетов по зависимостям (8—12) рекомендуются табл. 3—6, где приведены значения чисел, возведенных в степень $^3/_2$ и $^2/_3$.

4.4. Определение характеристик бетона к поздним срокам нормального твердения

Из приведенных зависимостей следует, что для прогнозирования различных характеристик к поздним срокам бетона с использованием контрактометрического способа требуется знать к наперед заданному времени количество химически связанной воды L_i в материале.

Для этой цели используется зависимость следующего вида:

$$L_i=L_0\left(\frac{\tau_i}{\tau_0}\right)^m \text{ или } \lg L_i=\lg L_0+m\ (\lg \tau_i-\lg \tau_0), \qquad (13)$$

Таблица 7

Значения $\left(\frac{\tau_i}{\tau_0}\right)^m$ в зависимости от диапазона водоцементных отношений и типа цемента

Относительная продолжительность твердения $\frac{\tau_i}{\tau_0}$	$W/C<0,4$				$W/C>0,4$			
	Алюминатный $m=0,125$	Алюминатно-алитовый $m=0,148$	Обычный алитовый $m=0,164$	Белитовый пуццолановый $m=0,21$	Алюминатный $m=0,121$	Алюминатно-алитовый $m=0,137$	Обычный (алитовый) $m=0,160$	Белитовый ШПЦ $m=0,176$
2	1,091	1,109	1,120	1,157	1,087	1,100	1,118	1,130
3	1,148	1,177	1,198	1,259	1,142	1,162	1,192	1,213
5	1,223	1,268	1,300	1,403	1,214	1,247	1,294	1,327
7	1,290	1,334	1,376	1,503	1,265	1,306	1,365	1,409
10	1,334	1,406	1,459	1,622	1,321	1,371	1,445	1,500
14	1,390	1,479	1,524	1,742	1,377	1,419	1,524	1,589
21	1,462	1,567	1,644	1,92	1,445	1,517	1,626	1,706
28	1,517	1,629	1,726	2,009	1,496	1,578	1,702	1,795
40	1,585	1,726	1,832	2,168	1,563	1,658	1,803	1,914
60	1,667	1,832	1,959	2,366	1,641	1,754	1,928	2,056
90	1,754	1,945	2,089	2,518	1,722	1,854	2,056	2,208
120	1,820	2,028	2,193	2,729	1,807	1,923	2,148	2,317
150	1,871	2,109	2,270	2,864	1,832	1,986	2,228	2,410
180	1,914	2,168	2,339	2,972	1,871	2,032	2,291	2,489
210	1,950	2,198	2,404	3,069	1,910	2,080	2,350	2,564
240	1,986	2,249	2,455	3,162	1,941	2,118	2,399	2,618
270	2,004	2,291	2,506	3,243	1,968	2,153	2,455	2,673
300	2,037	2,323	2,541	3,304	1,991	2,178	2,483	2,723
330	2,061	2,355	2,585	3,381	2,014	2,208	2,523	2,767
360	2,084	2,388	2,624	3,436	2,037	2,239	2,559	2,818

где L_0 — количество химически связанной воды к сроку τ_0 при прогнозе L_i и $\tau_i<360$ суток следует принимать: (для алюминатного и быстротвердеющего цементов $\tau_0=1$ сутки, для алитового $\tau_0=2$ суток, для белитового, пуццоланового и шлакопортландцементов $\tau_0=3$ суток, а для цементов с добавками, замедляющими гидратацию цемента в начальный период, значение τ_0 находится в пределах 3—7 суток; при прогнозировании L_i к сроку $\tau_i>360$ суток (несколько лет) для всех цементов рекомендуется принимать $\tau_0=28$ суток);

m — показатель степени, отражающий минералогический состав цемента (усредненные данные об $L_0=L_1$ и m приведены в табл. 1);

τ_i — заданное время, сутки.

В табл. 7 приведены значения $\left(\frac{\tau_i}{\tau_0}\right)^m$ для основных типов цементов.

Таким образом, для определения L_i и последующего прогнозирования характеристик бетона необходимо с помощью дифференциального контрактометра определить L_0 и произвести расчет по зависимости (13). Рекомендуется значение m уточнять в каждом частном случае.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

5.1. Оптимальная продолжительность изотермической стадии

Время, к которому прирост разности давлений Δp при заданной температуре изотермии не превышает 0,02 Δp см дб. ст./ч принимается за оптимальное ($\tau_{опт}$). Начиная с этого времени рекомендуется приступать к снижению температуры, то есть к третьей последней стадии обработки.

В качестве примера на черт. 8 приведены 3 кривые кинетики контракции с указанием $\tau_{опт}$ для температуры изотермии 70; 80 и 95°С. Из графиков следует, что в начале наибольшая скорость гидратации цемента имеет место при температуре изотермии 95°С, однако наиболее высокая степень гидратации цемента к $\tau_{опт}$ — при температуре изотермии 70°С. Поэтому окончательное решение об оптимальной продолжительности принимается с учетом не только сроков, к которым гидратация цементов резко замедляется, но и степени гидратации цемента, ритма технологического процесса, расхода пара и пределов прочности бетона (расчетных или экспериментально установленных к сроку $\tau_{опт}$ в каждом случае).

5.2. Отклонение режима тепловлажностной обработки бетона и его состава от заданных значений

Установленный контрактометрическим способом в лаборатории режим тепловлажностной обработки бетона данного состава должен в производственных условиях обеспечить достижение к $\tau_{опт}$ заданного значения $\Delta p_{опт}$. Отклонение фактического значения Δp от заданного может быть вызвано двумя основными факторами. Первым из них является несоблюдение заданного режима по времени и температуре. В этом случае, в зависимости от условий, может быть принято решение о продолжении тепловой обработки до достижения разностью давлений значения $\Delta p_{опт}$ или прекращении обработки с обязательной оценкой по зависимости (8) фактического значения предела прочности.

Вторым фактором при соблюдении заданного режима может явиться отклонение в дозировании компонентов, в том числе и цемента на бетоносмесительном узле. В этом случае определяется количество цемента в бетоне по зависимости:

$$C = \frac{\Delta V}{L(1/\gamma_{\text{в}} - 1/\gamma_{w})}. \qquad (14)$$

Здесь значение L принимается равным тому, которое предварительно установлено к моменту $\tau_{опт}$ при заданном расходе цемента. По данным о фактическом расходе цемента судят о действительном значении водоцементного отношения, реальном пределе прочности бетона и принимают решение о продолжении или прекращении тепловлажностной обработки. Одновременно вносятся коррективы в дозирование на бетоносмесительном узле. Если режим обработки соблюдается, а дозирование осуществляется в пределах допуска, то отклонение Δp может быть вызвано изменением активности цемента. Учет этого фактора производится по зависимостям (8) и (10) и соответствующими коррективами состава бетона.

Для целей контроля режима тепловлажностной обработки может быть использована ультразвуковая аппаратура, отградуированная с помощью дифференциального контрактометра и поверяемая, как поэлементно, так и посредством воспроизведения кривой кинетики прочности бетона, построенной также на основе контрактометрических измерений.

6. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ ДЛЯ ДАННЫХ УСЛОВИЙ ЦЕМЕНТА И ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

6.1. Выбор цемента

На принятых заполнителях и сравниваемых цементах изготавливаются бетонные смеси при одинаковых водоцементных отношениях и коэффициентах уплотнения. Данные смеси подвергаются тепловой обработке по принятым или оптимальным режимам. Для бетонов нормального твердения рекомендуется проведение контрактометрических измерений в течение 3 суток. Сравниваются показатели подвижности смесей, расхода цемента, пределов проч-

ности бетонов, скорости и уровни кинетики контракции или характеристики структуры бетонов. По соотношению последних судят о степени использования гидратационных свойств того или иного цемента. При достижении одинаковой степени гидратации цементов (определяется по контрактометру) более высокие адгезионно-когезионные свойства обеспечивает тот цемент, бетон на котором обладает большим пределом прочности. При выборе цементов принимают во внимание также продолжительность тепловлажностной обработки, которая обеспечивает одинаковую степень гидратации цемента.

6.2. Выбор заполнителей

На принятом цементе и сравниваемых заполнителях изготовляют бетонные смеси с одинаковыми истинными водоцементными отношениями и коэффициентами уплотнения. Как и в предыдущем разделе обеспечиваются режимы твердения бетонов, одинаковая степень гидратации цемента (определяется по контрактометру) и определяются пределы прочности сравниваемых бетонов.

Адгезионно-когезионные свойства выше у тех заполнителей, бетон на которых при соблюдении указанных условий обладает большим пределом прочности. Окончательный выбор заполнителей производят с учетом водопотребности бетонных смесей, соответствующего расхода цемента, а также стоимости заполнителей и бетонов на их основе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Измерения величин, предусмотренные методикой, относятся к классу косвенных измерений. При косвенных измерениях значение искомой величины получают на основании известной зависимости, связывающей ее с другими величинами, подвергаемыми прямым излучениям.

Окончательный итог косвенного измерения следует из общей зависимости:

$$Q=\overline{X}_Q+q\pm t_p S_{\overline{X}_Q}, \qquad (15)$$

где Q — итоговое значение искомой величины;

$\overline{X}_Q$ — оценка истинного значения искомой величины по известной зависимости (см. формулы 2—10);

q — суммарная поправка, равная систематической погрешности и обратная ей по знаку;

t_p — коэффициент, отвечающий заданной доверительной вероятности P;

$S_{\overline{X}_Q}$ — среднее квадратическое отклонение результата.

Ниже изложен упрощенный способ определения погрешности измерения структурных характеристик и прочности бетона. Способ иллюстрируется на примере определения контракционного объема.

Пусть значения величин, входящих в формулу (2), будут следующими:

$$H=(70\pm0{,}3)\text{ см};\ \Delta p=(70\pm0{,}3)\text{ см дб. ст.};$$

$$V_в=(400\pm5)\text{ см}^3;\ p=(75{,}13\pm1{,}5)\text{ см дб. ст.};$$

$$T_0=(293\pm0{,}2)\text{ К};\ S=(0{,}125\pm0{,}005)\text{ см}^2.$$

$$T_1=(353\pm0{,}2)\text{ К}.$$

Все результаты даны со средними квадратическими отклонениями. Подставляя в исходную формулу (2) средние арифметические значения измеряемых прямыми способами величин и округленные значения постоянных, получим оценку истинного значения контракционного объема

$$\Delta\overline{V}=\frac{70\cdot400}{75{,}13\dfrac{353}{393}-70}+70\cdot0{,}125=33{,}45\text{ см}^3.$$

Относительное среднее квадратическое отклонение итогового результата в соответствии с выражением

$$\hat{\delta}\overline{X}_{\Delta V}=\hat{\delta}X_н^2+\hat{\delta}\overline{X}_{\Delta p}^2+\hat{\delta}\overline{X}_{V_в}^2+\hat{\delta}\overline{X}_p+\hat{\delta}\overline{X}_{T_1}+\hat{\delta}\overline{X}_{T_2}+\hat{\delta}\overline{X}_S \qquad (16)$$

составляет:

$$\frac{S\Delta\overline{V}}{\Delta\overline{V}}=\left(\frac{0{,}3}{70}\right)^2+\left(\frac{0{,}3}{70}\right)^2+\left(\frac{5}{400}\right)^2+\left(\frac{1{,}5}{75\cdot13}\right)^2+\left(\frac{0{,}2}{293}\right)^2+$$

$$+\left(\frac{0{,}2}{353}\right)^2+\left(\frac{0{,}005}{0{,}125}\right)^2=0{,}0273;$$

$$S\Delta\overline{V}=0{,}0273\ \Delta\overline{V}=0{,}0273\cdot33{,}45=0{,}91\text{ см}^3.$$

Итог косвенного измерения записывается в виде

$$\Delta V=(33{,}45\pm0{,}91)\ \text{см}^3.$$

Систематическая погрешность, возникающая при косвенных измерениях, определяется в соответствии с выражением:

$$\Theta=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial^2 F}{\partial Q_i^2}\right)S^2_{\hat{Q}_i}=\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial^2 \Delta V}{\partial p^2}\right)S_p^2+\left(\frac{\partial^2 \Delta V}{\partial T_1^2}\right)S^2_{T_1}+\right.$$

$$\left.+\left(\frac{\partial^2 \Delta V}{\partial T_2^2}\right)S^2_{T_2}+\left(\frac{\partial^2 \Delta V}{\partial \Delta p^2}\right)S^2\Delta p\right]. \qquad (17)$$

Поскольку вторые производные по остальным аргументам равны нулю, то $\Theta=0{,}0098$ см³.

$$\Theta=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V}{p^2}S_p^2+\frac{\Delta V}{T_1^2}S^2_{T_1}+\frac{\Delta V}{T_2^2}S^2_{T_2}\frac{\Delta V}{\Delta p^2}S^2_{\Delta p}\right)=\left(\frac{33{,}45}{(75\cdot13)^2}1{,}5^2+\right.$$

$$\left.+\frac{33{,}45}{293^2}\,0{,}2^2+\frac{33{,}45}{353^2}\,0{,}2^2+\frac{33{,}45}{70^2}0{,}3^2\right)=0{,}00098\ \text{см}^3.$$

Полученная величина настолько мала, что все равно пропадает при округлении. Поэтому принимается $\Theta=0$, а следовательно $q=0$.

Число степеней свободы для контрактометрических измерений вышеуказанных характеристик можно принимать $k_{эфф}=12{,}5$.

Для доверительной вероятности $P=95\%$ из известной таблицы распределения Стьюдента находим интерполяцией $t_{0,95}=2{,}04$.

Тогда доверительная погрешность составляет

$$\hat{\delta}_{0,95}=t_{0,95}S\Delta\overline{V}=2{,}04\cdot0{,}91=1{,}86\ \text{см}^3$$

и итог измерений можно записать в виде

$$\Delta V=(33{,}45\pm1{,}86)\ \text{см}^3\ (P=95\%).$$

Рассчитанная относительная максимальная погрешность измерений структурных характеристик и прочности бетона на основе контрактометрического способа составляет:

$$1.\ \frac{\overline{S}_{\Delta V}}{\Delta\overline{V}}\cdot100\%=\pm2{,}7\%;$$

$$2.\ \frac{\overline{S}_L}{\overline{L}}\cdot100\%=\pm3{,}8\%;$$

$$3.\ \frac{\overline{S}V_i}{\overline{V}_i}\cdot100\%=\pm4{,}3\%;$$

$$4.\ \frac{\overline{S}V_{ki}}{\overline{V}_{ki}}\cdot100\%=\pm5{,}2\%;$$

$$5.\ \frac{\bar{S}V_{ni}}{\bar{V}_{ni}} \cdot 100\% = \pm 5{,}4\%;$$

$$6.\ \frac{\bar{S}V'_{ni}}{\bar{V}'_{ni}} \cdot 100\% = \pm 7{,}0\%;$$

$$7.\ \frac{\bar{S}_R}{\bar{R}} \cdot 100\% = \pm 8{,}1\%.$$

При дозировании компонентов бетона с относительной погрешностью $\pm 1\%$ значения $\frac{\bar{S}\bar{X}_Q}{\bar{X}_Q}$ по пп. 2—7 уменьшаются примерно вдвое по сравнению с приведенными.

МЕТОДИКА

Определения характеристик структуры и пределов прочности бетона на основе измерения контракционного объема

МИ 84—76

Редактор *А. Л. Владимиров*
Технический редактор *В. Н. Прусакова*
Корректор *В. С. Черная*

Т—02749 Сдано в наб. 17.08.76 Подп. к печ. 18.02.77 1,75 п. л.
1,54 уч.-изд. л. Тир. 10000 Цена 8 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов. Москва, Д-557, Новопресненский пер., 3
Тип. «Московский печатник». Москва, Лялин пер., 6. Зак. 1441