

КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ БЕЗВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Н. А. Колесников, Н. И. Тупов, Н. И. Довнар

При возведении зданий и сооружений из монолитного бетона эффективным путем улучшения технико-экономических показателей является применение литых бетонных смесей.

Применение литых бетонных смесей в монолитных конструкциях позволяет в большинстве случаев полностью исключить вибрационное уплотнение смеси; сократить трудоемкость, энергоемкость, стоимость и время бетонирования конструкций; повысить их качество и производительность труда; улучшить санитарно-гигиенические условия производства за счет значительного уменьшения или отказа от работ с вибраторами.

Если литые смеси отвечают требованиям "Руководства по укладке бетонных смесей бетононасосными установками" (М: Стройиздат, 1978), то во многих случаях для уменьшения трудоемкости бетонирования и сроков возведения зданий и сооружений целесообразно использование бетононасосов при укладке смеси ярусами максимальной возможной высоты.

Разумеется, их использование должно обеспечивать получение требуемого качества укладки и надлежащей однородности бетона по высоте бетонируемого блока как при безвибрационной технологии бетонирования, так и при укладке смеси с вибрацией.

Для опытной проверки возможности укладки литой смеси без виброуплотнения и получения при этом требуемых качества укладки и однородности бетона было выполнено бетонирование трех фрагментов стены с размерами 3,0х3,0х0,8 м, имеющих значительную насыщенность арматурой и конструктивные особенности, характерные для некоторых ответственных сооружений, например, стен АЭС.

Армирование отдельного фрагмента выполнялось двумя сетками, устанавливаемыми у каждой поверхности стены, с ячейкой 200х200 мм из стержней $d=20$ мм, и кроме этого он имел следующие закладные детали и проходки:

сквозную проходку, нормальную к плоскости стены, образованную трубой $d=600$ мм; продольную проходку в стене, образованную трубой $d=400$ мм; прямоугольный проем 1000х1000 мм; пакет из труб $d=100$ мм для образования кабельных каналов; закладные детали из швеллеров, пронизывающих стену.

Удельный расход металла (арматуры и закладных деталей) в опытных фрагментах составил 330 кг на 1 м^3 уложенного бетона

В плане примыкающие друг к другу фрагменты образовали единую конструкцию П-образной формы. Опалубка фрагментов выполнялась съемной, деревянной. Бетонную

смесь укладывали сразу на всю высоту стен бетононасосом БН 80-20 без виброуплотнения.

Два фрагмента заполнены смесью, имеющей в момент укладки осадку конуса (ОК) 19-24 см, один фрагмент - смесью с ОК=17 см.

Состав бетонной смеси, уложенной в экспериментальные фрагменты, соответствовал производственному составу бетона класса В25 с незначительными отличиями по содержанию пластифицирующей добавки для получения смесей различной подвижности.

Производственный состав бетона класса В25 характеризуется следующим расходом материалов на 1 м³ смеси:

портландцемент с минеральными добавками марки 400	360 кг;
песок кварцевый с модулем крупности 2,5-2,8	855 кг;
щебень гранитный (50%) и гравий (50%) фракции 5-20 мм	1045 кг;
вода	170 л;
модифицированный (цементом) лигносульфонат технический (в пересчете на сухое вещество добавки)	0,6% от массы цемента.

Качество бетонирования оценивалось визуально и простукиванием поверхности фрагментов стен после распалубки, а также осмотром кернов, выбуренных на различных участках фрагментов, в том числе непосредственно под проходками и проемами, где неплотное заполнение бетонируемого объема наиболее вероятно.

Некачественное бетонирование, выразившееся в неплотном заполнении объема в пределах защитного слоя, было отмечено только во фрагменте стены, где использовалась смесь с осадкой конуса 17 см.

Для изучения изменения свойств бетона по высоте укладываемого слоя при различных способах его укладки и уплотнения был дополнительно изготовлен фрагмент стены длиной 1,6 м, высотой 2,0 м и толщиной 0,3 м.

Для бетонирования использовалась металлическая опалубка. По длине стены опалубка была разделена на четыре блока-столба по 0,4 м. Во все блоки укладывалась бетонная смесь с ОК=23 см: в первый - слоями по 0,4-0,5 м с виброуплотнением каждого слоя в течение 10-15 с; во второй - в один прием сразу на всю высоту фрагмента (виброуплотнение продолжительностью 10-15 с осуществлялось только в верхней части блока погружением виброулавки на глубину 30-40 см); третий и четвертый блоки заполнялись бетонной смесью на всю высоту в один прием без виброуплотнения.

Состав бетонной смеси (на 1 м³) : портландцемент марки 500 - 515 кг; песок - 683 кг; щебень фракции 5-20 мм - 945 кг; вода - 198 л; суперпластификатор С-3 - 0,8% от массы цемента.

После 28-ми суточной выдержки из бетона фрагмента стены выбуривались керны для изготовления цилиндрических образцов.

Однородность бетона фрагмента стены оценивалась по результатам испытаний образцов-цилиндров на сжатие ($R_{сж}$), динамическому модулю упругости ($E_{дин}$), вычисленному по скорости прохождения ультразвука, и средней плотности (ρ). Полученные результаты свидетельствуют о том, что бетон достаточно однороден во всех блоках по всей высоте фрагмента стены. Имеющиеся различия в величинах характеристик бетона невелики и находятся в пределах обычно наблюдающегося разброса результатов испытаний (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытания образцов-цилиндров

Номер блока	Зона вы- бур. кернов	Колич. образцов шт.	Средняя плотн. бет. ρ , кг/м ³	$E_{дин}$, МПа	$R_{сж}$, МПа %	Кoeffиц. вариации C_v
1	верхняя	6	2380	48100	<u>53,3</u> 100,0	0,096
	средняя	6	2380	47400	<u>57.5</u> 107,9	0,082
	нижняя	6	2390	47000	<u>57.0</u> 106,9	0,074
2	верхняя	6	2370	45900	<u>54.0</u> 100,0	0,139
	средняя	6	2360	44600	<u>53,5</u> 99,1	0,075
	нижняя	6	2370	46700	<u>58.0</u> 107,4	0,094
3 и 4	верхняя	12	2350	46300	<u>55.4</u> 100,0	0,094
	средняя	12	2370	46100	<u>55.9</u> 100,9	0,111
	нижняя	12	2350	45100	<u>50.2</u> 90,6	0,083

Примечание. За 100 % принята прочность бетона верхней зоны каждого блока.

Таким образом, бетонная смесь, отвечающая требованиям “Руководства” для получения литых, нерасслаивающихся, перекачиваемых смесей, при высоте блока бетонирования до двух-трех метров позволяет получать однородный бетон при укладке без виброуплотнения.

В связи с недостаточной изученностью особенностей развития длительных деформаций усадки и ползучести бетонов безвибрационного уплотнения, одновременно с во-

просами технологии укладки таких смесей исследовались также и характеристики длительных деформаций.

Исследования проводились на четырнадцати сериях опытных образцов, в которых варьировались вид цемента, его марка, расход компонентов на 1 м^3 бетона, вид и процентное содержание химической добавки и подвижность смеси. Для сокращения места в дальнейшем в качестве примера будут рассмотрены результаты только трех серий: 11, 12 и 13. Результаты других серий аналогичны.

Для изготовления образцов указанных серий использовался цемент марки 600. Расход материалов на 1 м^3 составил (в порядке нумерации серий) соответственно: цемент - 393, 390, 430 кг; песок - 722, 720, 715 кг; щебень известняковый фракции 5-10 мм - 385, 386, 375 и фракции 10-20 мм - 712, 716, 693 кг; вода - 166, 165, 175 л.

Кроме расхода компонентов, другими отличительными особенностями данных серий образцов являлись процентное содержание химической добавки и подвижность смеси:

серия 11 - без добавки (контрольный состав бетона), ОК = 0 - 1 см;

серия 12 - с добавлением 0,65% от массы цемента суперпластификатора С-3, ОК = 14 см;

серия 13 - 0,6% суперпластификатора С-3, ОК = 22 см;

Экспериментальные значения длительных деформаций бетона опытных образцов определялись по стандартной методике (ГОСТ 24544-81: "Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести").

Бетонирование образцов-призм производилось в горизонтальном положении в металлических разъемных формах с уплотнением бетонной смеси (кроме литой с ОК=22 см, заполнявшей форму за счет текучести) на стандартной виброплощадке.

Отформованные образцы в течение суток хранились в формах, укрытые от высыхания полиэтиленовой пленкой, при температуре $20\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, после чего распалубливались и гидроизолировались.

Деформации ползучести бетона серий 11-13 исследовались только при нормальной температуре ($T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$) в условно линейной области (при напряжениях $\sigma \leq 0,4 \cdot R_{\text{пр}}$), а деформации усадки - при нормальной и повышенной температурах.

Изучение влияния повышенной температуры на развитие и величину деформации усадки бетона производилось при четырех уровнях температуры: 60, 80, 100 и $120\text{ }^\circ\text{C}$ по схеме их последовательного ступенчатого увеличения от начальной температуры $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, продолжительность высыхания (усадки) бетона при которой, после 7-ми дневного влажного хранения, составила 120 суток. Воздействие каждого уровня повышенной температуры было ограничено соответственно 30, 42, 56 и 70 сутками.

Принятая схема испытания позволяла получить максимальную величину (верхнюю оценку) деформаций усадки бетона опытных серий [1].

Гидроизоляция опытных образцов-призм, предназначенных для исследования деформаций ползучести и усадки бетона при нормальной температуре, осуществлялась парафином и двумя слоями полиэтиленовой пленки с промазкой между ними техническим вазелином:

по всей поверхности для призм на ползучесть и по боковой поверхности для призм на усадку, в соответствии с методикой моделирования усадочных деформаций бетона конструкций массивных и средней массивности [2].

Гидроизоляция призм для испытания бетона на усадку при повышенных температурах осуществлялось наклейкой по боковой поверхности алюминиевой фольги (ТУ 48-0810-13-84) на шпаклевке ЭП-0010 с использованием в качестве отвердителя полиэтиленполиамина.

Величины предельных длительных деформаций бетона определялись на основе зависимости вида:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_{n-1} \cdot M_n, \quad (1)$$

где ε_0 - величина предельной деформации ползучести или усадки "эталонного" бетона для некоторых условий, принятых за средние;

M_i - поправочные коэффициенты, учитывающие отклонения действительных условий работы конструкций от принятых средних.

Коэффициенты M_i являются, таким образом, функциями учитываемых факторов $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n$.

$$M_1 = M_1(X_1), M_2 = M_2(X_2), \dots, M_{n-1} = M_{n-1}(X_{n-1}), M_n = M_n(X_n). \quad (2)$$

С целью упрощения расчетных формул из 13 факторов, учитывающих влияние изменчивости условий приготовления и эксплуатации, параметров исходных материалов и состава бетона [3], оказалось возможным ограничиться в выражении (1) четырьмя факторами, главным образом определяющих развитие каждого вида длительных деформаций бетона при заданных видах и уровнях воздействий.

Поскольку соотношение исходных материалов: водоцементное отношение (В/Ц) и состав бетона (содержание цементного теста P_t) одинаково важны для прогнозирования и деформаций ползучести и деформаций усадки, то эти факторы учитывались в обоих случаях.

Влияние значений активности цемента (R_c) и возраста бетона в момент загрузки (τ_1) учитывались только при определении величины деформаций ползучести, а продолжительности влажного хранения до начала испытания (τ_w) и температуры окружающей среды (T) - при определении величины усадки бетона, так как температурный режим для деформаций ползучести не варьировался.

В связи с тем, что экспериментально существенного влияния химдобавок, введенных индивидуально или в комплексе, на ползучесть и усадку не обнаружено: разброс значений деформаций находится в пределах, традиционно наблюдаемых при испытании бетона без добавок, их наличие в составе бетонной смеси не учитывалось.

Под эталонным бетоном в проведенных исследованиях понимается бетон на портландцементе марки 500, плотном известняковом щебне, кварцевом песке, с В/Ц=0,4, расходом цемента 400-430 кг/м³, нормального твердения, с суперпластификатором С-3 в дозировке 0,6-0,7% от массы цемента.

Средними условиями при испытании такого бетона на ползучесть считались условия, при которых бетон не имеет влагообмена с окружающей средой, загружается в возрасте $\tau_1=28$ суток сжимающими напряжениями $\sigma=0,4 R_{пр}$ и находится под нагрузкой при постоянной температуре $T_0=20$ °С.

При испытании эталонного бетона на усадку за средние условия принимались условия, характеризующиеся следующим:

бетон находится в условиях одномерного (осевого) высыхания при относительной влажности воздуха $W=70\%$; модуль открытой поверхности $M_o=5$ м⁻¹, что характеризует конструкцию как среднемаассивную; измерение усадки начинается после 7-дневного влажного хранения ($\tau_w=7$ сут.).

Удельные относительные деформации ползучести бетона вычислялись по формуле:

$$C(t, \tau_1) = C_{э.т.}(t, 28) \cdot \prod_{i=1}^4 K_i, \quad (3)$$

где

$$C_{э.т.}(t, 28) = C_{э.т.}(\infty, 28) \cdot f(t, 28), \quad (4)$$

$$\prod_{i=1}^4 K_i = K(R_{ц}) \cdot K(W/Ц) \cdot K(P_r) \cdot K(\tau_1). \quad (5)$$

Здесь τ_1 и t - соответственно момент приложения нагрузки и момент наблюдения деформаций ползучести;

$C_{э.т.}(\infty, 28)$ - предельная [при $\Delta t = (t - \tau_1) \rightarrow \infty$] величина удельных относительных деформаций ползучести эталонного бетона для условий, принятых за средние;

$C_{э.т.}(t, 28)$ - величина удельных относительных деформаций ползучести эталонного бетона к моменту времени t ;

$K(R_{ц})$, $K(W/Ц)$, $K(P_r)$ и $K(\tau_1)$ - поправочные коэффициенты, учитывающие влияние изменчивости соответствующего фактора: $R_{ц}$, $W/Ц$, P_r или τ_1 ,

$f(t, 28)$ - функция, учитывающая длительность действия нагрузки на развитие деформаций ползучести.

По результатам исследований предельная величина удельных относительных деформаций ползучести эталонного бетона составила:

$$C_{э.т.}(\infty, 28) = 32,0 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}. \quad (6)$$

Численные значения поправочных коэффициентов K_i приведены в табл. 2.

Значения поправочных коэффициентов K_i

Учитываемый фактор и вид коэффициента K_i	Велич. учит. факт. и знач. коэфф. K_i					
Активность цемента $R_{ц}$, МПа	30	40	50	60	70	80
$K(R_{ц})$	1,19	1,05	1,00	0,95	0,93	0,92
Водоцементное отношение (В/Ц)	0,20	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60
$K(В/Ц)$	0,32	0,60	1,00	1,56	1,88	2,24
Содерж. цем. теста (по массе), %	15	20	25	30	35	40
$K(P_т)$	0,80	1,00	1,23	1,46	1,68	1,93
Возраст бет. при загружен. τ_1 , сут.	7	28	60	90	180	360
$K(\tau_1)$	1,26	1,00	0,81	0,78	0,61	0,55

Примечание. Для промежуточных значений факторов коэффициенты K_i допускается определять по интерполяции.

Функция длительности действия нагрузки имеет вид:

$$f(t, \tau_1) = 1 - 0,28 \cdot e^{-0,018 \Delta t} - 0,57 \cdot e^{-0,01 \Delta t}, \quad (7)$$

где $\Delta t = (t - \tau_1)$ - время действия постоянной нагрузки, отсчитываемое с момента ее приложения, сут.

Как следует из вида $f(t, \tau_1)$, деформации ползучести бетона безвибрационного уплотнения в условно линейной области достигают предельных величин (затухают) примерно через десять лет.

Аналитическое определение удельных деформаций ползучести бетона по приведенным зависимостям сводится к следующему.

Вычисляем содержание цементного теста (по массе) в бетоне опытных серий:

серия 11 - $P_т = [(393+166)/(393+166+722+385+712)] \times 100 = 23,5\%$; аналогично для серий 12 и 13 имеем соответственно $P_т = 23,35\%$ и $P_т = 25,3\%$.

По табл. 2 находим значения поправочных коэффициентов, учитывая при этом, что активность цемента к моменту изготовления образцов существенно уменьшилась и соответствовала марке 500 (для экономии места ограничимся результатами одной серии).

Серия 13: $R_{ц} = 500$ - $K(R_{ц}) = 1,0$; $В/Ц = 0,407$ - $K(В/Ц) = 1,04$; $P_т = 25,3\%$ - $K(P_т) = 1,24$; $\tau_1 = 28$ сут. - $K(\tau_1) = 1,0$.

Предельные значения удельных относительных деформаций ползучести опытного бетона определяем по формуле (3):

$$C(\infty, 28) = C_{ст.}(\infty, 28) \cdot \prod_{i=1}^4 K_i = 32,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 1,04 \cdot 1,24 \cdot 1,0 = 41,3 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Для произвольного момента времени t величины удельных деформаций ползучести бетона найдем, используя функцию длительности действия нагрузки $f(t, \tau_1)$.

Например, к моменту времени $t = 360$ сут. для бетона серии 13 получим:

$$\Delta t = (t - \tau_1) = (360 - 28) = 332 \text{ сут.}; f(t, \tau_1) = 1 - 0,28 \cdot e^{-0,018 \cdot 332} - 0,57 \cdot e^{-0,01 \cdot 332} = 0,8254;$$

$$C(t, \tau_1) = C(\infty, 28) \cdot f(t, \tau_1) = 41,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8254 = 34,1 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Для других интервалов времени действия нагрузки $\Delta t = (t - \tau_1)$ поступаем аналогично.

Как показывает анализ полученных результатов, наблюдается в основном достаточно хорошее качественное и количественное соответствие теоретических, рассчитанных по приведенным зависимостям, и опытных величин деформаций ползучести бетона. Лишь на начальных участках наблюдения (при малых $\Delta t = t - \tau_1$) погрешность оценки бывает ощутимой (табл. 3).

Для определения возможных потерь преднапряжения арматуры за весь срок службы конструкции из бетона безвибрационного уплотнения эти участки практического значения не имеют. Интенсивность развития этих потерь сразу же после нагружения можно установить на основе более сложной аппроксимирующей формулы для $C(t, \tau_1)$ [2].

Таблица 3

Результаты опытных образцов серии 13

Δt , сут.	Значения $C(t, \tau_1) \times 10^6, \text{ МПа}^{-1}$:		Погрешность оценки, %
	опытные	теоретические	
1	6,50	6,44	-0,93
3	9,04	6,94	-30,3
8	12,0	8,18	-46,7
27	20,0	12,3	-62,6
53	22,9	16,9	-30,2
121	27,7	25,0	-10,8
255	34,3	32,2	-6,52
322	36,2	33,9	-6,78
3650	-	41,3	-

Относительная величина деформации усадки бетона, развивающаяся с момента окончания его влажного хранения (τ_w), вычислялась по формуле:

$$S_y(t, \tau_w) = S_{y, \text{эт.}}(t, 7) \cdot \prod_{i=1}^n M_i, \quad (8)$$

где

$$S_{y, \text{эт.}}(t, 7) = S_{y, \text{эт.}}(\infty, 7) \cdot f_y(t, 7), \quad (9)$$

$$\prod_{i=1}^n M_i = M(B/C) \cdot M(P_\tau) \cdot M(\tau_w) \cdot M(T). \quad (10)$$

Здесь:

$S_{y, \text{эт.}}(\infty, 7)$ - предельная [при $\Delta t_w = (t - \tau_w) \rightarrow \infty$] относительная величина деформации усадки эталонного бетона для условий, принятых за средние;

$S_{y, \text{эт.}}(t, 7)$ - величина деформации усадки эталонного бетона к моменту времени t ;

M_i - поправочные коэффициенты, учитывающие отклонения действительных условий работы конструкции от принятых средних;

$f_y(t, 7)$ - функция продолжительности высыхания при температуре $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

Предельная величина относительных деформаций усадки эталонного бетона по результатам проведенных опытов составила:

$$S_{y.ст.}(\infty, 7) = 16,4 \cdot 10^{-5} \quad (11)$$

Значения коэффициентов M_i приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения поправочных коэффициентов M_i

Учитываемый фактор и вид коэффициента M_i	Велич.	учит.	факт.	и знач.	коэфф.	M_i
Водоцементное отношение (В/Ц)	0,20	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60
$M(\text{В/Ц})$	0,62	0,83	1,00	1,12	1,19	1,26
Содерж. цем. теста (по массе), %	15	20	25	30	35	40
$M(P_T)$	0,92	1,00	1,13	1,32	1,63	2,03
Продолж. влажн. хранен. τ_w , сут.	1	3	5	7	10	>14
$M(\tau_w)$	1,11	1,10	1,004	1,00	0,96	0,93
Температ. окружающ. среды T , °C	20	40	60	80	100	120
$M(T)$	1,00	1,15	2,12	2,82	2,98	3,10

Примечание. Для промежуточных значений факторов коэффициенты M_i допускается определять по интерполяции.

Функция продолжительности высыхания бетона при температуре $T_0 = 20$ °C и относительной влажности воздуха $W=70\%$ имеет вид:

$$f_y(\Delta t_w) = 1 - 0,25 \cdot e^{-0,001 \Delta t_w} - 0,55 \cdot e^{-0,009 \Delta t_w} \quad (12)$$

Влияние повышенных температур учитывалось функцией вида:

$$f(\Delta t_T) = 1 - e^{-0,012 \nu \Delta t_T} \quad (13)$$

где

$\Delta t_w = (t - \tau_w)$ - продолжительность высыхания бетона с момента окончания его влажного хранения, сут.;

τ_w и t - соответственно момент окончания влажного хранения бетона и момент наблюдения деформаций усадки, сут.;

$\Delta t_T = (t_T - \tau_T)$ - время действия повышенной температуры T °C, сут.;

τ_T и t_T - соответственно начало и конец действия повышенной температуры T °C, сут.;

$0,012 \cdot \nu$ - параметр, характеризующий интенсивность затухания температурной усадки, сут.⁻¹;

$\nu = T/T_0$ - относительная величина повышенной температуры T .

Так как схема режима температурного воздействия на опытные образцы была принята в виде последовательного ступенчатого увеличения температур, то полная величина усадки бетона к концу и для промежуточных значений времени действия температуры с заданным уровнем будет, очевидно, равна сумме компонент усадки в конце каждо-

Для удобства расчетов усадочные деформации бетона при повышенных температурах условно разделяют на деформации, развивающиеся при нормальной температуре, и деформации температурной усадки, которые вызываются нагревом. Расчетную величину деформаций температурной усадки бетона определяют как разность между деформациями усадки бетона, подвергающегося нагреву, и деформациями усадки ненагревавшегося бетона [4].

Тем самым продолжительность затухания деформаций усадки при повышенных температурах, различных по уровню, предопределяется равной времени достижения предельных величин усадки бетона, высыхающего при нормальной температуре, то есть не зависящей от уровня температурного воздействия. Это противоречит результатам опытов, показывающим, что развитие деформаций усадки заканчивается тем быстрее, чем выше температура [5].

Поэтому в предлагаемой методике определения усадочных деформаций бетона не используется принцип наложения. Взамен него в основу рекомендуемого подхода положены экспериментально установленные закономерности. Рассмотрим суть подхода на примере расчета деформаций усадки одноосно высыхающего бетона опытной серии 13.

На первом этапе расчета находим по формуле (8) конечные (предельные) и текущие значения деформаций усадки при нормальной температуре.

С учетом значений поправочных коэффициентов M_i , установленных по табл. 4, для бетона серии 13: $M(B/C)=1,008$; $M(P_T)=1,14$, $M(\tau_w)=1,0$; $M(T)=1,0$, предельная величина относительных деформаций усадки этого бетона при $T_0=20^\circ\text{C}$ составит:

$$S_y(\infty, 7) = S_{y, \text{эт.}}(\infty, 7) \cdot \prod_{i=1}^4 M_i = 16,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,008 \cdot 1,14 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 18,9 \cdot 10^{-5}.$$

Величину деформации усадки $S_y(t, 7)$ к произвольному моменту времени t найдем, используя функцию продолжительности высыхания бетона $f_y(\Delta t_w)$ при $T_0=20^\circ\text{C}$:

$$S_y(t, 7) = S_y(\infty, 7) \cdot f_y(t, 7) \quad (14)$$

Значения деформаций усадки, рассчитанные таким образом, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Деформации усадки опытных образцов серии 13 при $T_0=20^\circ\text{C}$

Продолжит. высыхан. Δt_w , сут.	Значения $S_y(\Delta t_w) \times 10^5$:		Погрешность оценки, %
	опытные	теоретические	
1	3,26	3,86	18,40
5	4,18	4,25	1,67
11	5,57	4,82	-15,56
20	7,40	5,58	-32,62
32	9,05	6,54	-38,38
46	10,30	7,50	-37,33
67	11,40	8,79	-29,69
83	11,70	9,62	-21,62
120	12,10	11,10	-9,01

Далее по табл. 4 находим значение поправочного коэффициента $M(T)$, учитывающего температуру высыхающего бетона, и предельные величины относительных деформаций усадки при соответствующем температурном воздействии:

$$\begin{aligned} T=60\text{ }^{\circ}\text{C} & - S_y^{T=60}(\infty, \tau_T) = 18,9 \cdot 10^{-5} \times 2,12 = 40,0 \cdot 10^{-5}; \\ T=80\text{ }^{\circ}\text{C} & - S_y^{T=80}(\infty, \tau_T) = 18,9 \cdot 10^{-5} \times 2,82 = 53,3 \cdot 10^{-5}; \\ T=100\text{ }^{\circ}\text{C} & - S_y^{T=100}(\infty, \tau_T) = 18,9 \cdot 10^{-5} \times 2,98 = 56,3 \cdot 10^{-5}; \\ T=120\text{ }^{\circ}\text{C} & - S_y^{T=120}(\infty, \tau_T) = 18,9 \cdot 10^{-5} \times 3,10 = 58,6 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

К моменту повышения температуры до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ за время высыхания бетона $\Delta t_w = t - \tau_w = 120$ сут. при нормальной температуре в нем успеет проявиться следующая величина деформации усадки:

$$S_y(\Delta t_w) = S_y(\infty, 7) \times f_y(\Delta t_w = 120) = 18,9 \cdot 10^{-5} \times 0,591 = 11,1 \cdot 10^{-5}.$$

Увеличение деформаций усадки за неограниченное [$\Delta t_T = (t - \tau_T) \rightarrow \infty$] время действия повышенной температуры с уровнем $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (собственно температурная усадка) составит:

$$\Delta S_y^{T=60}(\Delta t_T \rightarrow \infty) = S_y^{T=60}(\infty, \tau_T) - S_y(\Delta t_w) = 40,0 \cdot 10^{-5} - 11,1 \cdot 10^{-5} = 28,9 \cdot 10^{-5}$$

К произвольному моменту $\Delta t_T = (t - \tau_T)$ времени действия повышенной температуры успеет проявиться только часть этих деформаций, определяемая функцией $f(\Delta t_T)$ (см. формулу 13).

В нашем случае продолжительность температурного воздействия с уровнем $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила 30 сут., т. е. $\Delta t_T = 30$ сут. При этом успела проявиться усадка:

$$\Delta S_y^{T=60}(\Delta t_T = 30) = \Delta S_y^{T=60}(\Delta t_T \rightarrow \infty) \times f(\Delta t_T = 30) = 28,9 \cdot 10^{-5} \times 0,6604 = 19,1 \cdot 10^{-5}.$$

Полная величина усадки будет равна сумме двух компонент первой, характеризующей ее накопление на участке высыхания бетона при $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 120 сут., и второй - при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 сут.

Следовательно, величина деформации усадки, рассчитанная к моменту окончания воздействия температуры $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, для бетона опытной серии 13 составит:

$$S_y(\Delta t_w + \Delta t_T) = S_y(\Delta t_w = 120) + \Delta S_y^{T=60}(\Delta t_T = 30) = 11,1 \cdot 10^{-5} + 19,1 \cdot 10^{-5} = 30,2 \cdot 10^{-5}.$$

Величины деформаций усадки, рассчитанные таким образом, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Деформации усадки бетона опытной серии 13 при $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Δt_T , сут.	Значения $S_y(\Delta t_w + \Delta t_T) \times 10^5$:		Погрешность оценки, %
	опытные	теоретические	
0	12,1*	11,1**	-9,01
1	12,3	12,2	-0,82
3	14,2	14,1	-0,71
7	17,8	17,6	-1,14
10	20,1	19,9	-1,01
14	23,2	22,6	-2,65
21	26,9	26,4	-1,89
30	30,4	30,2	-0,66

* Величина усадки, измеренная перед началом нагрева до $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

** Величина усадки, рассчитанная перед началом нагрева до $T=60^{\circ}\text{C}$.

Повышение температуры до 80°C , очевидно, интенсифицирует процесс высыхания бетона, а следовательно и скорость развития деформаций усадки. Величину последней (температурную и полную) найдем аналогично предыдущему.

За неограниченное ($\Delta t_T \rightarrow \infty$) время действия температуры 80°C увеличение деформаций усадки бетона (температурная усадка) составит:

$$\Delta S_y^{T=80}(\Delta t_T \rightarrow \infty) = S_y^T(\infty, \tau_T) - S_y(\Delta t_w + \Delta t_T).$$

С учетом предельного значения относительной деформации усадки при $T=80^{\circ}\text{C}$: $S_y^{T=80}(\infty, \tau_T) = 53,3 \cdot 10^{-5}$, и значения $S_y(\Delta t_w + \Delta t_T) = 30,2 \cdot 10^{-5}$ к моменту окончания воздействия температуры 60°C получим:

$$\Delta S_y^{T=80}(\Delta t_T \rightarrow \infty) = 53,3 \cdot 10^{-5} - 30,2 \cdot 10^{-5} = 23,1 \cdot 10^{-5}.$$

За 42 дня температурного воздействия с уровнем 80°C успеет проявиться усадка:

$$\Delta S_y^{T=80}(\Delta t_T = 42) = \Delta S_y^{T=80}(\Delta t_T \rightarrow \infty) \times f(\Delta t_T = 42) = 23,1 \cdot 10^{-5} \times 0,8668 = 20,0 \cdot 10^{-5}.$$

Полная величина усадки к моменту окончания воздействия температуры $T=80^{\circ}\text{C}$ будет равна сумме трех компонент: первой, характеризующей ее накопление за 120 суток высыхания бетона при температуре 20°C , второй - за 30 суток при 60°C , и третьей - за 42 дня при 80°C .

С учетом этого найдем:

$$S_y(\Delta t_w + \Delta t_T) = 30,2 \cdot 10^{-5} + 20,0 \cdot 10^{-5} = 50,2 \cdot 10^{-5}.$$

Аналогично определены величины полных деформаций усадки бетона для промежуточных значений времени действия повышенной температуры с уровнем 80°C (табл. 7).

Таблица 7

Деформации усадки бетона опытной серии 13 при $T=80^{\circ}\text{C}$

Δt_T , сут.	Значения $S_y(\Delta t_w + \Delta t_T) \times 10^5$:		Погрешность оценки, %
	опытные	теоретические	
0	30,4*	30,2**	-0,66
1	32,0	31,3	-2,24
3	34,2	33,3	-2,70
7	37,6	36,8	-2,17
10	40,2	39,0	-3,08
14	43,0	41,5	-3,61
21	46,1	44,9	-2,67
28	49,2	47,3	-4,02
35	50,0	49,0	-2,04
42	52,4	50,2	-4,38

* Величина усадки, измеренная перед началом нагрева до $T=80^{\circ}\text{C}$.

** Величина усадки, рассчитанная перед началом нагрева до $T=80^{\circ}\text{C}$.

Теоретическая аппроксимация кривых усадки для уровней температурного воздействия 100 и 120 °С привела к результатам, представленным в табл. 8 (из-за ограниченности места приведены результаты только для T=120 °С). Последовательность расчета величин усадки при этом аналогична случаям воздействия температур 60 и 80 °С.

Таблица 8

Деформации усадки бетона опытной серии 13 при T=120 °С

Δt_T , сут.	Значения		Погрешность оценки, %
	опытные	$S_v(\Delta t_w + \Delta t_T) \times 10^5$: теоретические	
0	56,9*	56,1**	-1,43
1	57,6	56,3	-2,31
3	58,2	56,6	-2,83
7	59,1	57,1	-3,50
10	60,2	57,4	-4,88
14	61,6	57,7	-6,76
21	61,4	58,0	-5,86
28	62,0	58,3	-6,35
42	62,2	58,5	-6,32
56	62,4	58,6	-6,48
70	62,1	58,6	-5,97

* Величина усадки, измеренная перед началом нагрева до T=120 °С.

** Величина усадки, рассчитанная перед началом нагрева до T=120 °С.

Как следует из сопоставления результатов проведенных экспериментов и теоретических расчетов, наблюдается хорошее качественное и количественное соответствие деформаций усадки бетона опытных серий во всем диапазоне повышенных температур.

Учитывая, что нарушение химических форм связи воды затворения с клинкерными минералами может быть достигнуто главным образом за счет химического взаимодействия и лишь иногда прокаливанием, а для удаления влаги, связанной физико-химически (в основном структурно и адсорбционно) и механически (свободной воды), определяющей объемные изменения цементного камня, достаточно высушивания его при температуре 100 °С, что было реализовано в данных опытах, не следует ожидать существенного увеличения деформаций усадки бетона при повышении температуры, например, до 150 °С.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Требуемое качество укладки и однородность бетона безвибрационного уплотнения обеспечиваются при подвижности смеси 20-24 см и толщине слоя укладки до двух-трех метров.
2. Бетонные смеси с ОК = 20 - 24 см, по составу отвечающие требованиям "Руководства по укладке бетонных смесей бетононасосными установками", в случае необходимости, например в густоармированных или сложной формы конструкциях, для надежного распределения смеси или удаления заземленного воздуха могут подвергаться "вибропобуждению" - кратковременному вибрированию продолжительностью до 5-10 с без их расслаивания.
3. Вследствие медленного развития деформаций ползучести в условно линейной области (при напряжениях $\sigma \leq 0,4 R_{пр}$) основные потери напряжений в преднапряженной арматуре конструкций из бетонов безвибрационного уплотнения проявятся в поздние периоды времени.
4. Конечные потери в напрягаемой арматуре таких конструкций могут составить вследствие ползучести бетона даже при нормальной температуре более 100 МПа. При учете влияния повышенных температур на увеличение деформаций ползучести следует ожидать величину потерь напряжений порядка 300-400 МПа.
5. Относительные деформации усадки бетонов безвибрационного уплотнения в условиях ступенчато-возрастающего до 120 °С температурного воздействия могут достигать величины, превышающей 60×10^{-5} .
6. Предлагаемая методика определения длительных деформаций бетонов безвибрационного уплотнения свободна от недостатков других методик и имеет надежную экспериментальную основу.

Л и т е р а т у р а

1. Кричевский А. П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. - М.: Стройиздат, 1984. - 148 с.: ил.
2. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). - М.: Стройиздат, 1966. - 443 с.: ил.
3. Прокопович И. Е., Застава М.М. О расчетном определении предельных длительных деформаций тяжелого бетона: Ж. "Бетон и железобетон", N5, 1972, с.35 - 37.
4. Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. - М., Стройиздат, 1986. - 224 с.: ил.
5. Лычев А. С. Температурная усадка бетона. - В сб.: Длительные деформативные процессы в бетонных и железобетонных конструкциях. - М.: Стройиздат, 1970. - с. 169,