

6
А-62

ОДЕССКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Инженер **ЗАСТАВА М. М.**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ
К АНАЛИЗУ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УСАДКЕ
И ПОЛЗУЧЕСТИ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ**

(Специальность 01.022 — сопротивление материалов
и строительная механика).

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОДЕССА — 1970

ОДЕССКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

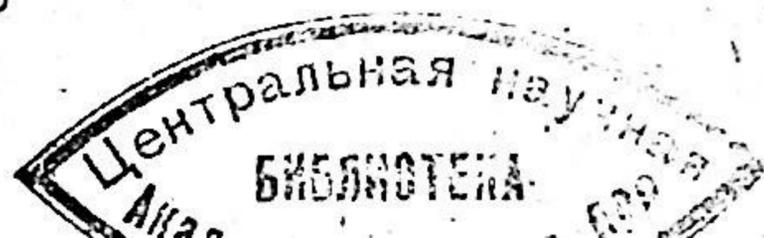
Инженер ЗАСТАВА М. М.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ
К АНАЛИЗУ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УСАДКЕ
И ПОЛЗУЧЕСТИ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ

(Специальность 01.022 — сопротивление материалов
и строительная механика).

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОДЕССА — 1970



испытаний и непосредственно связывающих деформации с напряжениями. Главной задачей этого направления является создание расчетного аппарата, предназначенного для описания напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций при кратковременных и длительных воздействиях.

Наконец, в самое последнее время начинает получать развитие третье, промежуточное направление, основанное на применении к изучению усадки и ползучести бетона теории случайных процессов. В этом направлении имеется небольшое число работ Ржаницына А. Р., Барашикова А. А., Львовского Е. Н. и Гансена Т.

До настоящего времени нет достоверной гипотезы о механизме ползучести и усадки бетонов, пригодной для теоретического построения соответствующих кривых. Поэтому для практического решения вопроса о расчетном определении усадки и ползучести весьма перспективен путь статистической обработки экспериментальных данных. Построение кривых на основе статистического анализа результатов опытов полезно не только для выработки определенных практических рекомендаций, но и может содействовать выявлению определенных закономерностей длительных процессов, проявляющихся «в массе» и теряющихся при отдельных опытах.

Настоящая работа посвящена статистическому анализу опытных данных по ползучести тяжелых бетонов при сжатии в условиях напряжений, характерных для эксплуатационной стадии ($S/R'_{пр} < 0,5$), а также по усадке.

В работе не освещены вопросы ползучести тяжелых бетонов при высоких напряжениях ($S/R'_{пр} > 0,5$); не исследовались влияния: формы эпюры напряжений, специальных добавок и примесей, а также облучения.

Учитывая характер выполненной работы, связанной с анализом и обобщением большого количества экспериментальных данных, а также современные тенденции относительно объема диссертации, автор был вынужден вынести основной фактический материал в приложения.

Таким образом, работа состоит из введения, четырех глав и приложений.

* * *

В первой главе дается краткий обзор существующих представлений о природе усадки и ползучести бетона и имеющихся предложений по их расчетному определению.

Исследованию физико-химической природы усадки и ползучести посвящены работы советских и зарубежных ученых: Александровского С. В., Берга О. Я., Вишневецкого Г. Д., Гансена Т., Гелера Г., Гвоздева А. А., Калоузека Л., Карапетяна К. С., Малмейстера А. К., Прокосовича И. Е., Столярова Я. В., Улицкого И. И., Фрейсине Е., Цилюсани З. Н., Шейкина А. Е. и других.

Современные теории объясняют усадку и ползучесть бетона сложными взаимозависимыми процессами, происходящими в цементном камне как в период его твердения, так и в дальнейшем, при эксплуатации конструкции. Главную роль, по современным представлениям, играет процесс миграции и испарения влаги из структуры цементного камня.

В настоящее время имеется некоторое количество предложений по расчетному определению величин характеристик ползучести и усадки. Это работы Росса А., Улицкого И. И., Берга О. Я., Михайлова В. В. и Маркарова Н. А., Вагнера О., Рюша Г., Серегина И. Н., Хромца Ю. Н., Щербакова Е. Н., Маиляна Р. Л. и некоторых других. Во всех этих предложениях учет влияния на величину деформаций различных факторов производится путем введения системы взаимнонезависимых поправочных коэффициентов к величинам, принятым за средние, т. е. на основании формулы

$$\varepsilon = \varepsilon^0 \cdot K_1 \cdot K_2 \dots K_n \quad (1)$$

Рекомендуемые величины ε^0 и $K_1 \div K_n$ разыскиваются путем обработки экспериментальных данных.

Выполненный анализ показал, что существующие предложения обладают рядом недостатков, а именно:

1) при разыскании предельных величин деформаций нет четкости в использовании данных о величинах, полученных при различных длительностях наблюдений;

2) при нормировании предельных величин усадки и ползучести большинство авторов дают некоторые усредненные значения для средних условий без указания возможных верхних и нижних границ отклонений;

3) поправочные коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов на длительные деформации бетонов, считаются взаимнонезависимыми; обоснования независимости действия этих факторов не приводится;

4) число факторов, от которых зависит расчетная величина деформаций, колеблется в широких пределах без достаточного обоснования необходимого их количества и размеров

погрешностей, вносимых в расчет при отбрасывании того или иного фактора;

5) при определении предельных характеристик ползучести и усадки не учитывается степень достоверности анализируемых результатов, которая зависит от условий эксперимента, точности измерений, количества образцов в серии;

6) во всех расчетных предложениях предполагается влияние всех факторов инвариантным по отношению к длительности испытаний, что не соответствует экспериментальным данным.

Кроме того, постоянное накопление экспериментального материала уже само по себе требует периодического уточнения расчетных характеристик усадки и ползучести бетона.

Как показало изучение результатов многих исследований, основные факторы, влияющие на характер протекания, промежуточные и конечные величины деформаций ползучести и усадки тяжелого бетона можно разделить на три группы:

1) факторы, связанные со свойствами и соотношениями материалов, применяемых при изготовлении бетона: вид, активность и тонкость помола цемента, вид и гранулометрический состав песка, порода, гранулометрический состав, прочностные и упругие свойства крупного заполнителя, водоцементное отношение и состав бетона;

2) условия приготовления и хранения бетона до загрузки: продолжительность перемешивания смеси; наличие, интенсивность и продолжительность вибрирования; размеры поперечного сечения конструкции; температура и влажность среды при предварительном хранении; продолжительность хранения до начала испытаний;

3) условия хранения бетона после загрузки: влажность и температура среды; обработка поверхности; размеры поперечного сечения элементов; возраст бетона к моменту загрузки; уровень напряжений; направление усилий относительно слоев укладки бетона; продолжительность действия нагрузки.

Все эти факторы влияют в той или иной мере на величину длительных деформаций и подлежат учету при нормировании и расчетном определении величин усадки и ползучести бетонов.

Во второй главе рассмотрены вероятностные методы оценки опытных данных по исследованию физико-механических свойств бетона, в том числе — его длительных деформаций.

Степень неоднородности, качества и свойства бетона колеблются в широких пределах. В связи с этим, при изучении

его физико-механических свойств применяются статистические методы обработки результатов экспериментов и вероятностный подход к обоснованию соответствующих нормативных величин. В этой области известны работы Глебова В. Д., Корсунцева И. Г., Муллера Р. А., Рюша Г., Скрамтаева Б. Г., Стольников В. В., Таля К. Э., Тихого М. и Ворличека М., Френкеля И. М. и других.

При решении вопросов, связанных с длительными деформациями, аппарат математической статистики применялся Гансеном Т., Барашиковым А. Я., Львовским Е. Н., Ржаницыным А. Р.

Для обоснования возможности применения методов математической статистики к анализу опытных данных по усадке и ползучести бетона, предварительно изучены вопросы, связанные с подходом к длительным деформациям как к случайным процессам.

Анализ второстепенных факторов, оказывающих влияние на характер кривых и величины длительных деформаций, а также изучение феноменологических зависимостей, применяющихся для описания усадки и ползучести, приводят к выводу о возможности классифицировать длительные деформации как нестационарные мультипликативные случайные процессы.

Для решения вопроса о поведении среднего квадратичного отклонения (стандарта) длительных деформаций во времени, проанализирован по результатам 40 серий опытов процесс изменения во времени нормированной корреляционной функции $r(t_k, t_l)$. Установлено, что для большинства опытов с самого начала или с некоторой величины $t - \tau$, $r(t_k, t_l) = 1$. Следовательно, стандарты усадки и ползучести являются величинами, переменными во времени.

На основании критерия χ^2 Пирсона доказана применимость закона Гаусса к распределению величин длительных деформаций.

Путем статистической обработки результатов 104 серий опытов с тяжелыми бетонами, проведенных различными авторами, получены численные величины стандарта при различных интервалах длительности действия нагрузки и различных условиях проведения экспериментов. Установлено, что величина стандарта зависит от числа образцов в серии, степени стационарности термовлажностного режима окружающей среды и условий на поверхности образцов (изоляция).

Приведены формулы, позволяющие на основе полученных величин стандартов определять такие статистические харак-

геристики, как вероятный интервал отклонения отдельных данных от их средних значений и наименьшая существенная разница между двумя сериями испытаний; производить анализ отношений длительных деформаций и статистическую обработку опытных данных с учетом их надежности.

Полученные статистические характеристики в дальнейшем применены к анализу величин усадки и ползучести тяжелых бетонов.

Третья глава посвящена статистическому анализу влияния различных факторов на усадку и ползучесть тяжелых бетонов.

При этом, прежде всего, изучены такие вопросы, как:

а) установление степеней взаимосвязи влияния отдельных факторов с получением соответствующих количественных оценок или обоснованием возможности независимого учета влияния;

б) получение данных, необходимых для приведения имеющихся результатов опытов к некоторым средним условиям с целью последующего получения усредненных кривых усадки и ползучести, а также средних расчетных предельных величин относительной усадки и меры ползучести бетона;

в) выработка рекомендаций по учету влияния этих факторов на длительные деформации тяжелых бетонов при их расчетном определении.

Для выяснения степени влияния отдельных факторов на длительные деформации бетонов принята следующая методика:

1) Из литературных источников выбирались опыты, по которым можно установить влияние определенного фактора на ползучесть и усадку тяжелого бетона.

2) В качестве показателя влияния исследуемого фактора на величину длительных деформаций принималось отношение величины меры ползучести или относительной усадки к той же характеристике длительных деформаций при величине исследуемого фактора, принятой за среднюю. Величины таких отношений и их стандарты определены для различных интервалов продолжительности испытаний.

3) Последовательно выяснялась степень взаимосвязи рассматриваемого фактора с другими.

Величины меры ползучести и относительной усадки при заданной продолжительности действия нагрузки зависят от n факторов, то есть являются функцией n переменных:

$$\epsilon = \epsilon(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \quad (2)$$

Однако, учитывая сложность построения такой функции в аналитической форме, недостаточную полноту имеющихся экспериментальных данных, а также желательность представления влияния отдельных факторов в наиболее простой и наглядной форме, удобно вместо (2) принять выражение

$$\epsilon = \epsilon^0 \cdot K_1 \cdot K_2 \dots K_n \quad (3)$$

принимавшееся ранее другими авторами без необходимого обоснования. При этом $K_1 = K_1(\xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{n0})$, $K_2 = K_2(\xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{n0})$, ..., $K_n = K_n(\xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{n0})$ подчинены условиям

$$\begin{aligned} \xi_{10} &= \xi_{10}, & K_1 &= 1 \\ \xi_{20} &= \xi_{20}, & K_2 &= 1 \\ &\vdots & & \\ \xi_{n0} &= \xi_{n0}, & K_n &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

При выполнении условий (4) $\epsilon = \epsilon^0$, т.е. ϵ^0 — длительная деформация при условиях, принятых за средние.

Показано, что для возможности представления функции (2) в виде (3) необходимо выполнение таких условий

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \xi_{3j}, \dots, \xi_{nk})}{\epsilon(\xi_{10}, \xi_{20}, \xi_{30}, \dots, \xi_{n0})} &= \text{const}; & \frac{\epsilon(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \xi_{3j}, \dots, \xi_{nk})}{\epsilon(\xi_{10}, \xi_{20}, \xi_{30}, \dots, \xi_{n0})} &= \text{const}; \\ & \dots & \frac{\epsilon(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \xi_{3j}, \dots, \xi_{nk})}{\epsilon(\xi_{10}, \xi_{20}, \xi_{30}, \dots, \xi_{n0})} &= \text{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

то есть речь идет о независимости первого отношения от ξ_1 , второго от ξ_2 , последнего от ξ_n . Проверка этих отношений должна выполняться при различных комбинациях значений остальных переменных.

Однако, в настоящее время связь некоторых факторов с другими невозможно проанализировать ввиду отсутствия соответствующих опытных данных. Нет необходимости устанавливать взаимосвязь и тех факторов, степень влияния которых на длительные деформации пока еще не может быть установлена из-за недостаточного числа имеющихся экспериментальных исследований. В связи с этим, количество факторов n в формуле (2) практически невелико (10—13 факторов).

4) Все величины показателей влияния разбивались на группы, соответствующие тем факторам, связь с которыми исследуемого фактора установлена. Для каждой группы каждого интервала времени определялись средние величины показателей влияния и их стандарт.

5) Вычерчивался график, иллюстрирующий зависимость показателя в виде семейства кривых, соответствующих различным длительностям наблюдений. Опытные кривые аппроксимировались приближенными плавными кривыми. При этом учитывался общий характер изменения показателя влияния.

6) По полученным аппроксимирующим кривым определялось принимаемое значение показателя влияния с соответствующим интервалом возможных отклонений от аппроксимирующего значения.

Несмотря на принципиальную возможность строгого вероятностного построения расчетных рекомендаций по учету влияния отдельных факторов на длительные деформации бетонов, недостаточное количество и большой разброс опытных данных приводят к необходимости применения в процессе анализа некоторых приближенных построений.

Для анализа влияния различных факторов на усадку ползучесть бетона использовались эксперименты, проведенные в различное время в ЦНИИПС, НИИЖБ, ЦНИИСК Госстроя СССР, НИИСК Госстроя СССР (Киев), ВНИИГ, Ленинградском политехническом институте, ЛИСИ, КИСИ, ОИСИ, Институте механики и математики АН АрмССР и в некоторых других, отечественных и зарубежных институтах и организациях.

После обработки по изложенной методике результатов 1223 опытов получены количественные показатели влияния на длительные деформации тяжелых бетонов влажности среды, величины относительного напряжения, возраста загрузки, размеров поперечного сечения образцов, водоцементного отношения, содержания цементного теста, вида, активности и тонкости помола цемента, марки бетона, вибрирования, вида крупного заполнителя, анизотропии, условий предварительного хранения.

Нужно отметить, что при анализе влажность и температура окружающей среды считались постоянными в течение всего времени опыта. Переменность этих факторов во времени не рассматривалась.

Показатели влияния получены для различных интервалов длительности испытаний с соответствующими интервалами вероятных отклонений при заданной степени надежности 95%.

Отмечается, что влияние некоторых факторов в настоящее время, ввиду малого числа опытных данных, не может быть достоверно установлено. К таким факторам относятся: вид

и гранулометрический состав песка; прочность, упругие свойства и гранулометрический состав крупного заполнителя, форма образцов, продолжительность перемешивания смеси, длительность и интенсивность вибрирования бетона при уплотнении.

Некоторые факторы удалось учесть лишь в общих чертах. Например, термовлажностный режим хранения бетона до начала испытаний можно пока учесть, лишь подразделив бетон по видам тепловой обработки: бетон естественного твердения, автоклавной обработки и пропаренный бетон.

Полученные предельные величины показателей влияния сравниваются с соответствующими результатами других авторов. Все они находятся в пределах численных величин, полученных различными исследователями или же дают вполне объяснимые отклонения.

Установлено, что влияние большинства факторов уменьшается с увеличением длительности испытаний.

В четвертой главе разработаны расчетные рекомендации по определению длительных деформаций тяжелых бетонов.

Результаты экспериментов, которые приводятся в литературе, имеют различные сроки наблюдения, что затрудняет их сопоставление и получение данных для нормирования длительных деформаций. Для решения задачи необходимо построить «усредненные» кривые усадки и ползучести тяжелого бетона. Для этого выбирается некоторый эталонный («средний») бетон, изготовленный из определенных исходных материалов, хранящийся и испытываемый при заданных условиях. Считается, что средний бетон:

1) готовится на портландцементе марки $R_{II} = 300$ кг/см² стандартной тонкости помола и гранитном щебне;

2) имеет водоцементное отношение $w/c = 0,4$; содержание цементного теста $p_T = 20\%$;

3) уплотняется при укладке вибрированием;

4) твердеет в естественных условиях;

5) применяется для конструкций с поперечным сечением, характеризующимся величиной обратного гидравлического радиуса $r = 0,4$ см⁻¹ (сечение 10×10 см);

6) хранится во влажных условиях до начала измерения усадки в течение 7 дней и загружается в 28 дней постоянным сжимающим усилием, соответствующим $S/R'_{пр} = 0,2$;

7) применяется в конструкциях, эксплуатируемых при влажности окружающего воздуха $W = 50\%$;

8) имеет марку 200.

В результате статистической обработки 275 серий опытов по определению усадки тяжелых бетонов получены кривые усадки и ползучести стандартного бетона.

Полученные кривые и данные о влиянии различных факторов на усадку и ползучесть бетонов позволили привести имеющиеся экспериментальные данные к эталону, соответствующему «среднему» бетону.

Путем анализа результатов 333 серий опытов по изучению усадки и 422 серий опытов по определению ползучести тяжелых бетонов для среднего бетона получены такие предельные характеристики длительных деформаций: характеристика ползучести $\varphi(\infty) = 2,2 \pm 0,3$, мера ползучести $C(\infty) = (7,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{кг/см}^2}$, относительная усадка $\epsilon_{yc} = (390 \pm 46) \cdot 10^{-6} \text{ мм/мм}$. Величины возможных отклонений характеристик определены с 95%-ной степенью надежности.

Усредненные кривые, предельные характеристики и показатели влияния различных факторов на усадку и ползучесть бетонов позволяют строить расчетные кривые длительных деформаций тяжелых бетонов для любых условий изготовления и эксплуатации, а также семейства кривых для различных возрастов загрузки бетона. Приведены примеры соответствующих расчетных построений.

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций особенно необходимо бывает вычислить величины предельных деформаций бетонов. При этом в процессе проектирования в первую очередь производится расчет конструкций на прочность, определяются их размеры и подбирается марка бетона. Ввиду этого целесообразно предельные величины длительных деформаций нормировать в зависимости от марки бетона (таблица 1). При этом принятые ранее стандартные условия целесообразно несколько изменить, приняв $\bar{r} = 0,2 \text{ см}^{-1}$ (сечение $20 \times 20 \text{ см}$) и $S/R'_{пр} = 0,5$, т. е. ближе к реально встречающимся. При условиях, отличающихся от стандартных, характеристики длительных деформаций нужно умножать на систему корректирующих коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов на длительные деформации бетона (таблица 2).

Чтобы длительные деформации ограничить определенными величинами, размеры которых диктуются действующими нормативными документами, при проектировании конструкций необходимо исходить из предполагаемых условий эксплуатации и задавать условия изготовления. Подавляющее

Таблица 1
Предельные характеристики длительных деформаций тяжелого бетона и их критерии

Марка бетона	100	150	200	300
$\varphi(\infty)$	$2,49 \pm 0,94$	$2,36 \pm 0,89$	$2,26 \pm 0,31$	$2,08 \pm 0,37$
$C(\infty) \cdot 10^{-6}$	$8,84 \pm 3,34$	$8,28 \pm 3,16$	$8,04 \pm 1,26$	$7,4 \pm 1,24$
K	$1 \pm 0,37$	$1 \pm 0,37$	$1 \pm 0,15$	$1 \pm 0,18$
$\epsilon_{yc}(\infty) \cdot 10^{-6}$				324 ± 38
M				$1 \pm 0,12$
Марка бетона	400	500	600--900	1000
$\varphi(\infty)$	$1,95 \pm 0,32$	$1,81 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,28$	$1,7 \pm 0,28$
$C(\infty) \cdot 10^{-6}$	$7,4 \pm 1,24$	$6,44 \pm 1,05$	$6,03 \pm 0,98$	$6,03 \pm 0,97$
K	$1 \pm 0,16$	$1 \pm 0,16$	$1 \pm 0,16$	$1 \pm 0,16$
$\epsilon_{yc}(\infty) \cdot 10^{-6}$				
M				

Таблица 2
Обозначения корректирующих коэффициентов

Группа факторов	Наименование факторов	Усадка	Ползучесть
I	Вид цемента	M_{11}	K_{11}
	Марка цемента $R_{ц}$	—	K_{12}
	Тонкость помола цемента $F_{цем}$	M_{13}	—
	Порода крупного заполнителя	M_{14}	K_{14}
	Водоцементное отношение $в/ц$	M_{15}	K_{15}
	Содержание цементного теста $p_{т}$	M_{16}	K_{16}
II	Способ уплотнения	M_{21}	K_{21}
	Вид тепловой обработки	M_{22}	K_{22}
	Длительность влажного хранения до начала проявления усадочных деформаций τ_w	M_{23}	—
	Возраст бетона в момент загрузки τ	—	K_{23}
III	Относительная влажность воздуха W	M_{31}	K_{31}
	Размеры поперечного сечения конструкции \bar{r}	M_{32}	K_{32}
	Величина относительного напряжения $S/R'_{пр}$	—	K_{33}

Корректирующие коэффициенты для учета влияния условий изготовления и хранения конструкций на усадку и ползучесть бетона

Вид тепловой обработки	Естественное твердение											Пропаривание		Автоклавная обработка	
	1											0,87 0,83		0,54 —	
τ_w	1	2	3	4	5	7	10	14	20	28	40	60	90	180	360 и более
M_{23}	$\frac{1,11}{1}$	$\frac{1,11}{1}$	$\frac{1,09}{0,98}$	$\frac{1,07}{0,96}$	$\frac{1,04}{0,94}$	$\frac{1}{0,9}$	$\frac{0,96}{0,86}$	$\frac{0,93}{0,84}$	$\frac{0,93}{0,84}$						
τ	1	2	3	5	7	10	14	20	28	40	60	90	180	360 и более	

а) Для меры ползучести

K_{23}	$\frac{2,75}{—}$	$\frac{1,85}{—}$	$\frac{1,65}{—}$	$\frac{1,45}{1,2}$	$\frac{1,35}{1,15}$	$\frac{1,25}{1,1}$	$\frac{1,15}{1,05}$	$\frac{1,1}{1,02}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,85}{0,85}$	$\frac{0,75}{0,75}$	$\frac{0,65}{0,65}$	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,4}{0,4}$
----------	------------------	------------------	------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------	---------------------	---------------------	---------------------	-------------------	-------------------

б) Для характеристики ползучести

K_{23}	$\frac{0,825}{—}$	$\frac{0,85}{—}$	$\frac{0,91}{—}$	$\frac{1}{1,07}$	$\frac{1,05}{1,05}$	$\frac{1,075}{1,03}$	$\frac{1,06}{1}$	$\frac{1,06}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,855}{0,865}$	$\frac{0,81}{0,775}$	$\frac{0,715}{0,675}$	$\frac{0,56}{0,56}$	$\frac{0,465}{0,44}$
----------	-------------------	------------------	------------------	------------------	---------------------	----------------------	------------------	------------------	---------------	-----------------------	----------------------	-----------------------	---------------------	----------------------

Примечания. 1. В числителе даны величины M и K для бетонов естественного твердения, в знаменателе — для бетонов тепловой обработки.

2. Для бетонов ручного уплотнения следует принимать $M_{21}=1,1$ и $K_{21}=1,3$.

Таблица 5

Корректирующие коэффициенты для учета влияния условий эксплуатации конструкций на усадку и ползучесть бетона

$W\%$	25	30	40	50	60	70	80	90	100		
M_{31}	1,25	1,18	1,1	1	0,88	0,77	0,7	0,66	—		
K_{31}	1,14	1,13	1,07	1	0,92	0,82	0,7	0,53	0,4		
\bar{r}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M_{32}	$\frac{0,54}{0,21}$	$\frac{0,76}{0,78}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,03}{1,03}$	$\frac{1,2}{1,05}$	$\frac{1,31}{—}$	$\frac{1,4}{—}$	$\frac{1,43}{—}$	$\frac{1,44}{—}$	$\frac{1,44}{—}$	$\frac{1,44}{—}$
K_{32}	$\frac{0,68}{0,825}$	$\frac{0,82}{0,93}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,12}{1,02}$	$\frac{1,14}{1,03}$	$\frac{1,34}{1,03}$	$\frac{1,41}{1,03}$	$\frac{1,42}{1,03}$	$\frac{1,42}{1,03}$	$\frac{1,42}{1,03}$	$\frac{1,42}{1,03}$
S/R'_{up}	0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		
K_{33}	0,855		0,855		0,92		0,99		1		

Примечания. 1. В числителе даны величины для бетонов естественного твердения, в знаменателе — для бетонов тепловой обработки.

2. Для изолированных конструкций и бетонов тепловой обработки принимать $K_{31}=1$.

четных и экспериментальных результатов. Однако, полученные по формулам (7) и (8) расчетные границы отклонений дают слишком большую «вилку», что неудобно на практике. Это является следствием большой величины стандартов отдельных факторов, а также различной методики проведения экспериментов.

Между тем, отклонения между вычисленными и опытными величинами $S(t, \tau)$ и $\varepsilon_{ус}(t)$ в большинстве случаев не превышают 20—25%. Поэтому для получения практически приемлемых границ возможных отклонений и для упрощения вычислений вероятных интервалов отклонения проведена статистическая обработка полученных расхождений расчетных и экспериментальных характеристик длительных деформаций. В результате получены приближенные величины вероятных интервалов отклонений в %, которые и рекомендуется использовать в практических целях. Для предельных величин деформаций эти интервалы равны, соответственно, $\pm 31\%$ для усадки и $\pm 32\%$ для ползучести тяжелого бетона.

Приведены примеры практического применения предложенного способа расчета длительных деформаций.

В заключение главы четвертой намечаются пути дальнейшего совершенствования предложенных методов расчетного определения усадки и ползучести бетонов.

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов экспериментов по изучению усадки и ползучести бетонов показал, что эти длительные процессы можно рассматривать как случайные процессы. В связи с таким подходом, усадка и ползучесть классифицированы как мультипликативные нестационарные случайные процессы. Определены основные статистические характеристики этих процессов для тяжелых бетонов. Это позволило далее в работе использовать элементы математической статистики и теории вероятностей.

2. Изучение экспериментальных данных показало, что характер протекания, промежуточные и конечные величины длительных деформаций зависят от большого числа факторов, которые можно условно разделить на три группы, охватывающие свойства и соотношения материалов, условия изготовления, хранения и испытаний (эксплуатации) бетонного элемента.

Влияние некоторых факторов на длительные деформации бетонов установить не удалось.

Таблица 6

Результаты исследования взаимосвязи различных факторов, влияющих на длительные деформации тяжелых бетонов

Факторы	W	S/R' пр	τ	τ_w	\bar{r}	R ₂₈	Состав бетона	в/ц	Вид цемента	Тепловая обработка
W	×		не уст.	не уст.	не уст.	не уст.		не уст.	+	+
S/R' пр		×		×	не уст.	—		не уст.		
τ			×	×	—	—	не уст.	—	не уст.	+
τ_w			×	×		не уст.			—	
\bar{r}					×	не уст.				+
R ₂₈			—	не уст.	не уст.	×				
Состав бетона			не уст.				×	не уст.		
в/ц			—				не уст.	×		
Вид цемента			не уст.	—					×	
Тепловая обработка			+		+					×

Установлено, что степень влияния большинства факторов зависит от длительности наблюдений, являясь максимальной в начале испытаний и уменьшаясь с увеличением $t-\tau$.

3. В результате проведенной работы автор пришел к некоторым представлениям о взаимосвязи влияния отдельных факторов.

В таблице 6 показано, какие зависимости между факторами, влияющими на длительные деформации бетонов, удалось установить, какие — нет и какие не удалось исследовать вообще ввиду отсутствия соответствующих экспериментальных данных. При этом установление зависимости обозначено знаком «+», отсутствие зависимости знаком «—», неустановленная зависимость — «не уст.», свободные клетки соответствуют неисследованным зависимостям. Влияние факторов, взаимосвязь которых не установлена или не исследовалась, пришлось вынужденно считать независимым.

4. Установлены количественные характеристики влияния различных факторов на величины длительных деформаций тяжелых бетонов, а также величины соответствующих корректирующих функций.

5. Построены усредненные кривые усадки и ползучести тяжелых бетонов для некоторого среднего бетона, изготовленного из определенных исходных материалов, хранящегося и испытываемого при заданных условиях.

6. Наличие усредненных кривых длительных деформаций и данных о влиянии различных факторов позволили привести имеющиеся результаты экспериментов к предельным величинам для среднего бетона. Путем последующего статистического анализа этих результатов получены предельные характеристики ползучести и усадки тяжелых бетонов, которые могут быть рекомендованы в качестве расчетных.

7. Разработаны рекомендации по определению средних величин длительных деформаций тяжелых бетонов.

8. Проанализирована возможность определения границ отклонений величин $\varphi(t, \tau)$, $C(t, \tau)$ и $\epsilon_{yc}(t, \tau)$ с заданной степенью надежности статистическим путем. Установлено, что этот способ, хотя и является теоретически обоснованным, дает слишком большой разброс экстремальных величин расчетных характеристик. Это, в основном, связано с недостаточным объемом и недостаточной точностью экспериментальных исследований этих явлений.

9. Статистический анализ величин отклонений средних вычисленных величин $C(t, \tau)$ и $\epsilon_{yc}(t, \tau)$ от фактических позволил предложить приближенный практический способ опре-

деления границ вероятных отклонений длительных деформаций с заданной степенью надежности. При этом средние величины деформаций определяются также, как предложено ранее — на основе точного статистического способа, границы же их возможного разброса принимаются приближенно, но зато более узкими, что практически более приемлемо.

10. Намечены пути дальнейшего совершенствования предложенного способа определения длительных деформаций, а также распространения его на другие виды бетонов.

Основные положения и результаты диссертации были доложены на конференции по проблемам усадки и ползучести бетона в г. Киеве в 1969 г., а также на научно-технических конференциях Одесского инженерно-строительного института в 1968, 1969 и 1970 годах.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах**

1. Прокопович И. Е., Застава М. М. Статистическая оценка экспериментальных данных о характеристиках ползучести и усадки бетона. Сборник «Строительные конструкции», вып. XII, Изд-во «Будивельник». Киев, 1969.

2. Прокопович И. Е., Застава М. М. О некоторых вопросах применения методов математической статистики для обработки экспериментальных данных по усадке и ползучести бетона. Материалы совещания по проблемам усадки и ползучести бетонов в г. Киеве, подготовленные Украинским республиканским правлением НТО Стройиндустрии и НИИСК Госстроя СССР. Киев, 1969.

БР 03165 Подписано к печати 29-1-71 г. Формат бумаги 60×84¹/₁₆
Печ. листов 1,5. Уч.-изд. листов 1,3. Заказ № 485 Тираж 200

Одесская городская типография
Управления по печати Одесского Облисполкома,
Ленина, 49