НИЛЭП ОИСИ

Рекомендации

по учету потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке



Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

Научно-исследовательская и проектная лаборатория
экспериментального проектирования
жилых и общественных зданий
Одесского инженерно-строительного института
(НИЛЭП ОИСИ)

Рекомендации

по учету потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке

Москва Стройиздат 1987

УКД 691.327 : 666.973.2 : 666.64 – 492.3 : 620.192 : 624.044 : 593.374

Рекомендовано к изданию секцией Научно-технического совета НИЛЭП ОИСИ.

Рекомендации по учету потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке / НИЛЭП ОИСИ. – М.: Стройиздат, 1987. – 104 с.

Содержат методику экспериментального и расчетного определения деформаций ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке и потерь предварительного напряжения в арматуре, вызванных ими.

Даны указания по проектированию и подбору составов керамзитобетона на карбонатном песке, приведены значения деформаций ползучести и усадки в зависимости от состава и класса бетона, а также характер их изменения во времени.

Для инженерно-технических и научных работников проектных, научно-исследовательских институтов и производственных операций, а также студентов строительных вузов.

Табл. 24, ил. 20.

3203000000 – 212
Р ---------- Инструкт.-нормат., 1 вып.-109 – 87
047 (01) – 87

© Стройиздат, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое применение легких бетонов для изготовления конструкций различного назначения и различных классов определяется комплексом всесторонних научных исследований этих бетонов и постоянно расширяющейся практикой строительства. В ряде случаев основные технико-экономические преимущества легких бетонов на местных заполнителях настолько существенны, что их применение становится более целесообразным по сравнению с обычным тяжелым бетоном и определяется только рассмотрением конкретных технологических вопросов.

В этих условиях уточненный учет длительных процессов усадки и ползучести таких бетонов при определении потерь предварительного напряжения особенно необходим, так как имеющиеся данные в отношении их деформативности и возможности применения для предварительно напряженных конструкций противоречивы и неоднозначны. Влияние, оказываемое ползучестью, усадкой бетона на работу конструкций, должно находить все более полное отражение в инженерных расчетах. Необходимым условием для этого является возможность достаточно надежной оценки численных значений указанных величин на стадии проектирования конструкций из керамзитобетона на карбонатном песке.

Керамзитобетон на карбонатном песке для многих районов СССР является местным строительным материалом и представляет собой одну из разновидностей легкого бетона, где в качестве мелкого заполнителя применяются отходы камнепиления известняка-ракушечника (карбонатная порода).

В настоящих Рекомендациях излагается методика экспериментального и расчетного определения деформаций ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке и практический метод получения числовых параметров ползучести, вызванных ими. Для получения числовых параметров ползучести, усадки и потерь предварительного напряжения от них использованы как простейшие статистические оценки совокупностей экспериментальных данных, так и многофакторный статистический анализ и теория планирования эксперимента для построения математических моделей длительного деформирования керамзитобетона на карбонатном песке.

Настоящие Рекомендации составлены на основе научно-исследовательских работ, выполненных в Одесском инженерно-строительном институте в 1974—1984 гг., и обобщения различных методик экспериментального и расчетного определения деформаций ползучести, усадки и потерь предварительного напряжения от них.

Рекомендации разработаны НИЛЭП ОИСИ (кандидаты технических наук А. С. Столевич — ответственный за выпуск, С. В. Макаров, Р. Л. Тимчишина, инженеры Е. В. Лысенко, В. Г. Суханов, А. И. Костюк, Г. Т. Филипович, И. А. Столевич, П. А. Сенкевич).

При составлении Рекомендаций использованы материалы НИИЖБ, ЦНИИЭП жилища, Ростовского ИСИ, Симферопольского филиала Укрнистромпроекта, АрмНИИСа, сектора строительных конструкций НИИС Литовской ССР, МАДИ, ЦНИИС Минтрансстроя СССР, НИИСК Госстроя СССР, а также рекомендации ЕКБ-ФИП.

Все замечания и предложения по содержанию настоящих Рекомендаций просьба направлять в НИЛЭП ОИСИ по адресу: 270029, г. Одесса, ул Дидрихсона, д. 4.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Рекомендации содержат положения по учету потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести и усадки при расчете железобетонных конструкций из керамзитобетона на карбонатном песке на цементном вяжущем.

1.2. Рекомендации составлены в соответствии ГОСТ 24544—81 с изм. «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести» и с учетом «Методических рекомендаций по исследованию усадки и ползучести бетона» (М.: НИИЖБ 1975), «Рекомендаций по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций» (М.: НИИЖБ, 1984) и базируются на углубленном изучении физико-механических свойств керамзитобетона на карбонатном песке.

1.3 Результаты статистической обработки опытных данных позволяют с большой надежностью прогнозировать для расчетов характеристики материала и количественные закономерности длительного деформирования керамзитобетона на карбонатном песке. Эти нормируемые параметры создают единую основу расчетных методов, используемых при проектировании с учетом влияния длительных процессов деформирования на работу конструкции.

1.4. Настоящие Рекомендации позволяют более точно оценить влияние ползучести, усадки и потерь предварительного напряжения на напряженно-деформируемое состояние, трещиностойкость и жесткость предварительно напряженных керамзитожелезобетонных конструкций и создают возможности для рационального и экономического их проектирования.

1.5. В настоящих Рекомендациях приведен расчет стержневых элементов предварительно напряженных железобетонных конструкций из керамзитобетона на карбонатном песке, применяемых в гражданском, промышленном, транспортном и других областях строительства и предназначенных для эксплуатации при температуре не выше 50° С и не ниже минус 40° С и относительной влажности воздуха в пределах от 30 до 100%. Температура и влажность среды устанавливаются заданием на проектирование, при отсутствии в задании необходимых указаний — определяются по отраслевым техническим условиям.

1.6. Настоящие Рекомендации содержат практические методики определения деформаций усадки, ползучести, их предельных значений и потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке.

Предлагаемые методики позволяют отразить влияние на указанные величины индивидуальных характеристик керамзитобетона на карбонатном песке, конструктивных особенностей железобетонного элемента, условий изготовления и эксплуатации.

1.7. Численные характеристики керамзитобетона на карбонатном песке, приведенные в настоящих Рекомендациях, предназначены только для проектирования. Характеристики арматуры, а также другие данные не нашедшие отражения в настоящих Рекомендациях, следует принимать по соответствующим нормативным документам.

1.8. Нормируемые в настоящих Рекомендациях деформативные характеристики керамзитобетона на карбонатном песке могут служить исходными данными не только для расчета потерь предвари-

тельного напряжения в арматуре, но также для других расчетных оценок, связанных с влиянием длительных процессов на напряженно-деформированное состояние керамзитожелезобетонных конструкций.

1.9. В настоящих Рекомендациях величины характеристик деформативности керамзитобетона даны применительно к условиям естественного твердения. При загружении длительной нагрузкой в раннем возрасте ($t_0<28$ сут) керамзитобетона, подвергнутого тепловой обработке, под t_0 следует подразумевать возраст, приведенный к условиям естественного твердения и определяемый согласно указаниям п. 6.16.

2. ТРЕБОВАНИЯ К КЕРАМЗИТОБЕТОНУ НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ

2.1. Керамзитобетон на карбонатном песке представляет собой легкий бетон, в котором в качестве мелкого заполнителя применяется песок, полученный путем дробления и отсева отходов камнепиления карбонатных пород (известняков-ракушечников).

2.2. Керамзитобетон на карбонатном песке по структуре, прочности, плотности в сухом состоянии, деформативности и другим показателям должен удовлетворять требованиям проекта, соответствующих технических условий и других нормативных документов.

2.3. По структуре керамзитобетон на карбонатном песке должен быть плотный (слитный), изготовленный из цементного вяжущего, воды, керамзита, карбонатного песка. Объем пустот должен составлять не более 6%.

2.4. Основные физико-механические характеристики керамзитобетона на карбонатном песке при обеспеченности 0,95 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Класс бетона	Значения характеристик бетона		
	предельная плотность в сухом состоянии ρ, кг/м³	нормативная призменная почность R_{bn}, МПа	нормативная прочность при растяжении $R_{bt,n}$, МПа
B10	1400	9,1	0,73
B12,5	1600	11,4	0,83
B15	1700	13,5	0,92
B20	1750	17,7	1,1
B25	1800	21,8	1,3
B30	1850	25,9	1,5

2.5. Средняя плотность керамзитобетона на карбонатном песке в высушенном до постоянной массы состоянии не должна превышать проектное значение более чем на 5%.

2.6. Коэффициент вариации при оценке прочности керамзитобетона на осевое сжатие V_R не должен превышать 0,135, а при оценке средней плотности V_ρ должен быть не более 0,05.

2.7. Прочность керамзитобетона в момент его обжатия усилием предварительного напряжения (передаточная прочность $R_{вр}$) должна назначаться в соответствии с требованиями СНиП 2.03.01—84.

2.8. Для приготовления керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется использовать местные заполнители, отвечающие требованиям действующих нормативных документов. Применение привозных заполнителей допускается только при соответствующем технико-экономическом обосновании.

2.9. В качестве крупного заполнителя рекомендуется применять керамзитовый гравий предельной крупностью не более 20 мм, отвечающий требованиям ГОСТ 9759—83.

2.10. Марку керамзитового гравия по насыпной плотности и его прочности при сдавливании в цилиндре в зависимости от заданного класса бетона по прочности при сжатии рекомендуется принимать по табл. 2.

Таблица 2

Класс бетона по прочности на осевое сжатие	Насыпная плотность, кг/м³	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа
В10	350—400	1—1,5
В12,5	400—450	1,5—2
В15	450—500	2—2,5
В20	500—600	2,5—3,5
В25	600—700	3,5—4,5

2.11. Рекомендуется применять керамзитовый гравий чисто рассортированный по фракциям 5—10, 10—20 мм. Отношение объема фракций 10—20 мм к объему фракций 5—10 мм в общем составе смеси рекомендуется назначать в пределах 1—1,5.

Содержание в смеси керамзитового гравия фракции 20—40 мм допускается не более 20% по объему.

2.12. Коэффициенты вариации насыпной плотности V_ρ и прочности V_R для каждой партии керамзитового гравия должны быть, соответственно, не более 0,05 и 0,15.

2.13. В качестве мелкого заполнителя для приготовления керамзитобетона на карбонатном песке применяется песок из известняков-ракушечников, полученный путем дробления и рассева отходов камнепиления и кусков известняка-ракушечника (бута).

2.14. Пригодность известняка-ракушечника для получения песка определяется прочностью песка, полученного путем дробления исходной породы или отсеянного из отходов без дробления.

Для приготовления керамзитобетонной смеси рекомендуется применять карбонатный песок прочностью не ниже 0,1 МПа.

2.15. Зерновой состав песка после отсева зерен крупнее 5 мм должен соответствовать требованиям, указанным в табл. 3.

Рекомендуется применять пески крупные или средние с модулем крупности $M_к = 2{,}0—3{,}5$ согласно ГОСТ 8736—85.

Содержание в песке зерен крупностью 5—10 мм должно быть не более 5% по массе.

Таблица 3

Размер отверстий контрольных сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	Менее 0,14
Полный остаток на контрольных ситах, % по массе	0—35	15—55	35—75	55—90	70—100	0—30

Наличие в песке зерен крупнее 10 мм не допускается.

2.16. Содержание в песке глинистых частиц допускается не более 1%.

2.17. Песок при обработке раствором едкого натра (колометрическая проба на органические примеси) не должен придавать раствору окраску темнее цвета эталона.

2.18. Содержание в песке водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO_3 не допускается более 1% по массе.

2.19. Для приготовления керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется применять портландцемент и шлакопортландцемент марок 300, 400, 500, отвечающие требованиям ГОСТ 10178—76

2.20. Вода для затворения керамзитобетонной смеси должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732—79.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ УСАДКИ И ПОЛЗУЧЕСТИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ, А ТАКЖЕ ПОТЕРЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АРМАТУРЕ

Принятые определения и обозначения. Общие требования к эксперименту

3.1. Эксперимент по изучению ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке, а также потерь предварительного напряжения в арматуре рекомендуется выполнять на образцах естественного твердения или подвергнутых тепловой обработке. Изучение потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести можно выполнять в условиях центрального или внецентренного сжатия при натяжении арматуры как на упоры, так и на бетон.

3.2. Экспериментальное определение деформаций усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется проводить параллельно, т. е. на образцах-близнецах одинаковых составов, размеров, изготовленных одновременно и наблюдаемых в одни и те же сроки, с размещенными на них аналогичными приборами для измерения деформаций, установленными на одинаковых базах и с помощью одинаковых средств.

3.3. Полной деформацией $\varepsilon(t, t_0)$ образца, нагруженного длительной нагрузкой, называется сумма деформаций, проявляющихся от начала загружения t_0 к рассматриваемому моменту времени t, состоящая из:

упругой (упруго-мгновенной) деформации ε_0;

деформации ползучести $\varepsilon_c(t, t_0)$, вызываемой нагрузкой;

деформации усадки $\varepsilon_s(t, t_w)$, связанной с высыханием образца;

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(t, t_0) + \varepsilon_s(t, t_w). \quad (1)$$

3.4. Упругую деформацию ε_0 бетонного образца, нагружаемого длительной нагрузкой, принимают равной:

при ступенчатом нагружении — сумме упругих деформаций $\Sigma\Delta\varepsilon_0$, возникающих от начала до конца приложения отдельной ступени нагрузки или догрузки;

при непрерывном нагружении — упругой деформации, возникающей к концу нагружения.

3.5. Деформацией усадки $\varepsilon_s(t, t_w)$ называется деформация бетонного ненагруженного образца, хранящегося при определенной постоянной температуре и влажности воздуха. При необходимости, чтобы исключить влияние случайных колебаний температуры воздуха в помещении, где проводятся опыты, рекомендуется применять соответствующие температурные эталоны в количестве не менее трех (см. п. 3.29).

3.6. Деформация ползучести $\varepsilon_c(t, t_0)$ образца, нагруженного длительной нагрузкой, представляет собой разность между полной деформацией образца и суммой его упругой деформации и средней арифметической величиной деформаций усадки, полученных на ненагруженных образцах-близнецах [1]:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon(t, t_0) - [\varepsilon_0 + \varepsilon_s(t, t_w)]. \quad (2)$$

При этом имеется в виду, что все образцы находятся в одинаковых условиях при определенной постоянной температуре и влажности окружающей среды.

3.7. Мерой ползучести (удельной ползучестью) $C(t, t_0)$ называется деформация ползучести, вызванная единичными напряжениями. Она определяется путем деления деформации ползучести на напряжение в бетоне σ_b, вызванное постоянной длительной нагрузкой.

$$C(t, t_0) = \varepsilon_c(t, t_0)/\sigma_b. \quad (3)$$

---

[1] Все неупругие деформации $\Sigma\Delta\varepsilon_{pl}$, проявляющиеся при ступенчатом нагружении образца в течение выдержек на отдельных ступенях нагружения, включаются в деформации ползучести.

3.8. Характеристикой ползучести $\varphi(t, t_0)$ называется частное от деления деформации ползучести на упругую деформацию

$$\varphi(t, t_0) = \varepsilon_c(t, t_0)/\varepsilon_0 = E_b(t_0)C(t, t_0), \qquad (4)$$

где $E_b(t_0)$ — начальный модуль упругости бетона в момент его нагружения.

3.9. В ходе эксперимента по исследованию усадки рекомендуется установить зависимости:

деформаций усадки от времени наблюдений;

влагопотерь керамзитобетона от времени наблюдений;

деформаций усадки от влагопотерь образца во время его высыхания;

а также определить:

предельные величины влагопотерь керамзитобетона;

предельную (равновесную) влажность керамзитобетона;

предельные деформации усадки;

физические характеристики бетона, связанные с его высыханием и усадкой: коэффициент линейной усадки (см. п. 3.80) и начальную влажность (см. п. 3.77).

3.10. При исследовании ползучести керамзитобетона на карбонатном песке необходимо:

установить зависимости текущих деформаций ползучести от уровня начальных напряжений, продолжительности действия нагрузки и возраста бетона к моменту загружения;

определить предельные величины деформаций ползучести;

установить условную границу области линейной деформации ползучести;

выделить из деформаций ползучести и изучить быстропатекающие деформации ползучести во время загружения и деформации ползучести, медленно развивающиеся во времени с момента окончания загружения;

определить прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемого бетона.

3.11. Кроме того, эксперимент может включать в себя изучение влияния на деформации усадки, ползучести и потерь предварительного напряжения технологических факторов (вида, качества, крупности и содержания в единице объема керамзитобетона мелкого и крупного заполнителя, сорта, марки и минералогического состава цемента, состава бетона, характера тепловой обработки бетона и условий его твердения, т. п.), а также некоторые другие специальные вопросы, например, исследование деформаций упругого последействия, релаксаций напряжений в бетоне и др.

3.12. Методика эксперимента по изучению усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке, а также потерь предварительного напряжения в арматуре должна предусматривать:

измерение текущих значений температуры и относительной влажности воздуха в помещении, где проводится опыт;

измерение текущих деформаций усадки незагруженных бетонных образцов, а также армированных образцов без предварительного напряжения;

измерение текущих значений влагопотерь незагруженных образцов;

определение полных текущих деформаций загруженных бетонных образцов, а также образцов, обжатых усилием предварительного напряжения;

построение кривых усадки и изменения влажности бетона во времени;

определение упругомгновенных и быстронатекающих деформаций ползучести в момент обжатия образцов;

определение текущих деформаций ползучести загруженных бетонных образцов, а также образцов, обжатых усилием предварительного напряжения;

построение кривой зависимости усадки бетона от изменения его влажности;

построение кривых изменения во времени модуля упругости и призменной прочности исследуемого бетона;

построение кривых деформаций ползучести керамзитобетона во времени в зависимости от уровня напряжений;

построение кривых мер ползучести исследуемого бетона;

построение кривых потерь от усадки и ползучести керамзитобетона во времени в зависимости от уровня обжатия;

построение кривых потерь напряжений в арматуре в области линейной и нелинейной ползучести бетона.

3.13. Измерения текущих значений температуры воздуха в помещении, где проводятся опыты, должны производиться с помощью ртутных термометров с ценой деления 0,1—0,2° С.

3.14. Определение относительной влажности воздуха в помещении, где проводится опыт, следует производить по психрометрическим таблицам с помощью технического психрометра. Не рекомендуется применение волосяных (бытовых) гигрометров, не обладающих стабильностью и требуемой точностью измерений.

3.15. В ходе опыта по изучению усадки, ползучести и потерь предварительного напряжения должны проводиться одновременные измерения: температуры и относительной влажности воздуха в помещении, массы и деформаций усадки образцов, деформаций температурных эталонов, деформаций ползучести загруженных образцов, деформации армированных образцов.

Опытные образцы, их изготовление и условия твердения

3.16. Опытные образцы из керамзитобетона на карбонатном песке, методы их изготовления и условия твердения должны удовлетворять требованиям ГОСТ 24544—81 с изм. и настоящих Рекомендаций.

3.17. Материалы для приготовления бетонной смеси и бетонная смесь должны удовлетворять требованиям пп. 2.8—2.20.

3.18. Формы для изготовления бетонных образцов должны удовлетворять требованиям ГОСТ 10180—78*. Они должны быть металлическими, жесткими, разъемными, со строганными или шлифованными внутренними поверхностями. Конструкция форм должна обеспечивать плотность стыков соединяемых частей, чтобы при формовании исключить утечку « цементного теста ». Их желательно объединять в кассеты.

Для предохранения форм от прилипания бетона ее рабочие поверхности смазываются. Для образцов, которые в ходе опыта подвергаются всестороннему высыханию или высыханию через торцы, рекомендуется смазка густым известковым молоком, для образцов,

защищенных от высыхания (изолированных), — смазка минеральными маслами.

3.19. Общее количество формуемых из одной смеси образцов-близнецов определяется требуемым объемом экспериментальных исследований. Отклонение плотности отдельных образцов серии не должно превышать ±20 кг/м³.

3.20. Формование образцов производится в горизонтальном положении. Образцы, по которым в дальнейшем замеряются деформации ползучести, можно формовать в вертикально расположенных формах.

Формование образцов производится на стандартной виброплощадке (частота колебаний 3000±180 об/мин; амплитуда колебаний 0,35...0,5 мм). Для каждого образца серии время вибрирования должно быть одинаковым. Время между приготовлением первого и последнего образца одной смеси не должно превышать 1 ч.

3.21. Образцы естественного твердения в течение 2—3 сут (до распалубливания) должны находиться в укрытых от высыхания формах при температуре помещения 20±2° С.

Пропаренные образцы распалубливают не позже чем через 1 сут после тепловой обработки.

3.22. Дальнейший режим твердения назначается в зависимости от поставленных задач исследования. В соответствии с программой исследований может быть назначен специальный режим хранения. В остальных случаях образцы хранятся согласно ГОСТ 10180–78*.

3.23. По истечению срока хранения, отвечающего его проектной марке (для лабораторных исследований обычно в возрасте 28 сут), образцы хранят в помещении с температурой воздуха 20±2° С и влажностью 65±5%.

3.24. Для измерения длительных деформаций кубиковой и призменной прочности, начального модуля упругости рекомендуется принимать образцы размерами 10×10×40, 15×15×60 см.

3.25. Стандартными образцами для определения деформаций усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется принимать призмы размером 10×10×40 см.

3.26. В качестве стандартных образцов для определения прочности на сжатие и призменной прочности следует принимать кубы размером 10×10×10 см и призмы размером 10×10×40 см.

Испытания их проводятся кратковременной нагрузкой до разрушения в соответствии с программой эксперимента и обязательно в возрасте 28 сут. В каждой группе должно быть не менее трех стандартных образцов.

3.27. Выбор размеров образцов для изучения потерь предварительного напряжения арматуры следует обосновывать в зависимости от целей эксперимента с учетом масштабного фактора массивности конструкции, коэффициента армирования.

3.28. Как известно, усадка бетона в наибольшей степени зависит от потерь бетоном капиллярной, структурно-связанной и адсорбированной воды. Поэтому существенное влияние на усадку оказывают температура и влажность окружающей среды.

Опыты по определению усадочных деформаций должны проводиться в условиях, максимально исключающих влияние изменения вышеуказанных факторов.

Полностью исключить возможное изменение температуры воздуха в помещении, где проводятся опыты, не представляется воз-

можным, поэтому деформации бетона, вызванные температурными колебаниями, должны замеряться на температурных эталонах.

3.29. Образцы, используемые в качестве температурных эталонов, должны быть изолированы от влажностных потерь и являться близнецами по отношению к рабочим. Измерение температурных деформаций рекомендуется производить по трем и более температурным эталонам. Гидроизоляция может осуществляться любыми экспериментально проверенными способами. Общепринятым является способ гидроизоляции последовательно слоем расплавленного парафина, полиэтиленовой пленки, технического вазелина и опять слоем полиэтиленовой пленки.

Приборы для измерения деформаций, а также и способы установки их на температурных эталонах и рабочих образцах должны быть одинаковыми.

3.30. Существенное влияние на усадку оказывает площадь высыхания образцов. Поэтому рекомендуется использовать образцы-близнецы, отличающиеся условиями высыхания.

Кроме температурных эталонов рекомендуется использовать образцы-близнецы всесторонне высыхающие и высыхающие только по торцам.

В каждой группе должно быть не менее трех образцов.

В ходе эксперимента образцы должны взвешиваться для определения их влагопотерь. Для этого необходимо применять устройства для их взвешивания без нарушения показаний приборов, используемых при измерении усадочных деформаций.

3.31. Опыты по изучению деформаций ползучести могут проводиться как на изолированных, так и на незащищенных от высыхания образцах.

При проведении опытов на изолированных образцах для исключения деформаций от температурных колебаний необходимо использовать температурные эталоны (пп. 3.28, 3.29).

Если опыты проводятся на незащищенных от высыхания образцах, то в качестве эталонов для исключения влияния на деформации ползучести колебаний температуры и влажности воздуха применяются незагруженные и неизолированные образцы, являющиеся близнецами по отношению к рабочим (эталоны). Приборы для измерения деформаций, а также способы установки их на эталонах и рабочих образцах должны быть одинаковыми.

3.32. Наряду с основными образцами с нестандартными размерами необходимо использовать также и стандартные образцы.

3.33. Стандартные образцы изготовляют из той же смеси, что и нестандартные, и хранят в одинаковых условиях.

Подбор составов керамзитобетона на карбонатном песке

3.34. Подбор составов керамзитобетона рекомендуется производить на тех же материалах, из которых будут изготовляться опытные образцы для изучения усадки, ползучести и потерь предварительного напряжения от них.

3.35. При подборе составов керамзитобетона в зависимости от постановленной в основном эксперименте цели должны быть заданы:

класс бетона по прочности на сжатие (или диапазон классов), средняя плотность или пределы ее изменения;

диапазон изменения расхода цемента, факторов состава (при изучении их влияния на усадку, ползучесть керамзитобетона на карбонатном песке и потери преднапряжения от них);

характеристики исходных материалов;

дополнительные требования к составам.

3.36. Подбор составов керамзитобетона включает следующие этапы:

определение свойств исходных материалов;

назначение исходного (базисного) состава для опытных замесов;

приготовление серии опытных замесов и обработка результатов испытаний образцов из этих замесов;

назначение составов керамзитобетона на карбонатном песке и при необходимости их корректировку по заданным характеристикам (п. 3.35).

3.37. Составы керамзитобетона подбираются на сухих заполнителях.

3.38. Качество керамзитобетонной смеси контролируется согласно ГОСТ 10181.(0—4).81.

3.39. Значения агрегатно-структурного фактора рекомендуется принимать в пределах $0{,}3<М/(М+К)<0{,}7$.

3.40. Расход компонентов исходного (базисного) состава на 1 м³ керамзитобетонной смеси рекомендуется определять в соответствии с указаниями «Рекомендаций по производству и применению керамзитобетона на известняковом песке для конструктивных элементов жилых домов» (М.: Стройиздат, 1986).

3.41. Полученный состав керамзитобетона на карбонатном песке проверяется на соответствие заданной прочности и плотности путем приготовления серии опытных замесов для изготовления опытной партии контрольных кубов размером 15×15×15 см.

3.42. При получении удовлетворительных результатов проверки полученный состав назначается в качестве исходного (базисного).

При неудовлетворительных результатах проверки полученный состав корректируют путем изменения содержания исходных материалов. Корректировку можно производить несколько раз до получения удовлетворительных результатов.

3.43. В показатели исходного (базисного) состава, помимо расхода компонентов, включают плотность керамзитобетона после формования, тепловой обработки, а также в высушенном до постоянной массы состоянии.

3.44. Для получения некоторого заданного по прочности на сжатие (или по другим показателям) диапазона составов керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется использовать для подбора составов методику планированного эксперимента, которая позволяет решать такую задачу в кратчайший срок с минимальными затратами.

3.45. Для получения диапазона классов бетона по прочности на сжатие (за счет изменения расхода цемента при постоянном расходе воды) в качестве одного из факторов рекомендуется принимать количество пылевидной фракции песка (<0,14 мм) в процентах от массы всего количества песка.

3.46. Эксперимент рекомендуется проводить по близкому к *D*-оптимальному плану для трех факторов, варьируемых на трех

уровнях В качестве контролируемых выходов принимаются прочность керамзитобетона и плотность его в высушенном до постоянной массы состоянии.

3.47. Указания по выбору факторов, интервалов их варьирования, а также методика обработки результатов эксперимента с целью получения математических моделей (уравнений регрессии) изложены в Рекомендациях по производству и применению керамзитобетона на известняковом песке для конструктивных элементов жилых домов.

3.48. В качестве основного уровня расхода компонентов состава керамзитобетона принимается расход для исходного (базисного) состава.

3.49. После окончательного построения уравнений регрессии проводят аналитическую и графическую интерполяцию их и назначают состав или группу составов, удовлетворяющих требованиям.

Оборудование для испытаний

3.50. Испытания образцов на прочность и определение модуля упругости бетона следует проводить на прессах, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 8905–82*. Допускается применение другого испытательного оборудования, отвечающего требованиям ГОСТ 10180— 78*.

3.51. Для испытания образцов на ползучесть следует применять пружинные, рычажные, рычажно-пружинные и гидрогравитационные установки, обеспечивающие измерение величины длительной нагрузки с точностью ±3% и не допускающие ее изменения в процессе исследования более чем на 2%. Для соблюдения последнего условия не допускается периодическое догружение образцов.

При применении пружинных установок рекомендуемая величина длительной нагрузки должна составлять 70—80% максимального усилия, допускаемого для данной установки.

3.52. Для нагружения образцов в пружинных установках мощностью 80 кН и более рекомендуется пользоваться гидравлическими домкратами, насосные станции которых снабжены образцовыми манометрами. Величина прикладываемой к образцу нагрузки должна находиться в пределах от 30 до 80% максимального давления, допускаемого для данного манометра.

3.53. Установки, предназначенные для нагружения призм длительной нагрузкой, предварительно тарируют путем приложения нагрузки через динамометр. Тарирование можно не производить, если в установку включен динамометр.

Пружины установок малой мощности разрешается тарировать на прессах, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 8905—82*.

3.54. В установках всех типов нагрузка через центрирующие шары передается на стальные опорные плиты, устанавливаемые на торцы призмы. Размеры опорных плит в плане должны быть не менее размеров сечения образца, а их толщина должна определяться расчетом и зависеть от прикладываемого усилия и сечения призмы.

Для призм размером 10×10×40 см, нагружаемых усилием до 200 кН, минимальную толщину опорных плит следует принимать 30 мм.

На поверхности опорных плит в плане при размерах, превышающих размеры сечения призмы, наносят разметку для центрирования образца по геометрической оси.

3.55. При применении пружинных установок необходимо соблюдать обязательное требование, предъявляемое к пружинам: при проектном усилии обжатия образца они должны иметь большую осадку, в 50—100 раз превосходящую возможное укорочение (удлинение) образца под нагрузкой вследствие ползучести бетона.

Если этого достичь не удастся, то для соблюдения требований постоянства усилия сжатия пружины в ходе опыта придется время от времени догружать.

3.56. При необходимости создания в образце усилия более 100 кН следует применять многопружинные установки, состоящие из пакета пружин, рычажно-пружинные или комбинированные приспособления.

3.57. В пружинных и рычажно-пружинных установках с пакетами пружин необходимо первоначально протарировать пружину, а затем уже в собранном виде протарировать сами установки.

Тяги пружинных установок должны быть динамометрическими и заранее протарированными, что позволяет контролировать фактическое усилие в образце по деформациям тяг при его нагрузке и разгрузке.

3.58. Пневматические, гидравлические и комбинированные силовые установки применяют для изучения деформаций ползучести в том случае, если они позволяют поддерживать заданный режим загружения или постоянство усилия в образце в течение длительного времени.

Приборы, их расположение и крепление

3.59. Применяемые приборы должны фиксировать деформации бетона с погрешностью, не превышающей 0,001% ($\varepsilon \cdot 10^{-5}$).

Обычно применяют индикаторы часового типа с ценой деления 0,001, 0,002, 0,01 мм, механические тензометры, переносные деформометры, тензодатчики активного сопротивления.

3.60. Точность измерения деформаций зависит от правильности расположения приборов на образце. Они должны быть установлены строго по осям граней. При этом приборы размещаются на одном уровне по высоте образца симметрично относительно его поперечных осей.

3.61. При кратковременных испытаниях рекомендуется устанавливать приборы на каждой грани призмы. При определении деформации усадки и ползучести допускается установить их на двух противоположных гранях.

3.62. База измерений деформаций — это расстояние между осями держателей.

Минимальная база измерений принимается с учетом минимальной крупности заполнителя, но не менее 50 мм, максимальная — $2/3h$ (где h — высота призм).

3.63. Крепление приборов к образцам осуществляется с помощью металлических рамок с держателями или держателей, завинченных в закладные анкеры либо приклеенных к телу бетона.

3.64. Анкеры замоноличиваются в бетон при его формовании. Допускается крепить анкеры к бетону перед испытаниями; для это-

го в местах их крепления высверливают в теле бетона отверстия и высокопрочными растворами замоноличивают в них анкеры.

3.65. Держатели к бетону рекомендуется приклеивать клеями на основе эпоксидных смол. При этом приклеиваемая поверхность должна иметь достаточную площадь для обеспечения надежности соединения.

3.66. Устройство для измерения деформаций с помощью индикаторов часового типа состоит из самого прибора, закрепленного верхним держателем, подвижного упора, закрепленного в нижнем держателе, и штанги, соединяющей подвижный упор с головкой индикатора.

Для надежности соединения в верхнем торце штанги делают лунку в виде вогнутой полусферы, треугольную лунку — на подвижном упоре. Нижний конец штанги обрабатывают в виде сферической головки.

3.67. Перед испытаниями и после них следует убедиться в работоспособности прибора.

Кратковременные испытания

3.68. Для сравнительных оценок результатов экспериментов по изучению длительных деформаций керамзитобетона необходимо проводить кратковременные испытания с целью определения кубиковой и призменной прочности, а также начального модуля упругости. Испытания следует проводить на стандартных образцах из исследуемого бетона (см. п. 3.26) разного возраста, в том числе обязательно в возрасте 28 сут.

3.69. Кубы и призмы для определения кубиковой и призменной прочности керамзитобетона при кратковременном сжатии необходимо испытывать на одном и том же прессе.

Для построения кривой роста прочности керамзитобетона при сжатии, а также изменения начального модуля упругости во времени, образцы рекомендуется испытывать в возрасте 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 180, 270 и 360 сут, причем в каждом из указанных сроков должно быть испытано не менее трех призм-близнецов и трех кубов-близнецов соответствующего сечения.

3.70. Испытания образцов следует производить в соответствии с требованиями ГОСТ 24452 80.

Определение деформаций усадки керамзитобетона. Обработка экспериментальных данных

3.71. Измерение деформаций усадки керамзитобетона следует начинать при естественном твердении бетона сразу после окончания его схватывания (затвердения), но не позднее трехсуточного возраста, а при термовлажностной обработке бетона — после остывания образцов. До начала измерений образцы должны храниться при температуре воздуха 20±3° С и относительной влажности не менее 90%, а далее — при температуре воздуха 20±3° С и относительной влажности 60±3%. Срок первого измерения деформаций устанавливают с момента изготовления образцов в часах или сутках.

Измерение деформаций рекомендуется производить в течение первых семи суток ежедневно, с 7 по 15-е сут. — через день, в по-

следующие 45 сут — два раза в неделю, затем до 120 сут — один раз в неделю и далее, до конца испытаний — 2 раза в месяц.

При этом должны быть зафиксированы деформации в возрасте 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 270 и 360 сут.

3.72. Отсчеты по приборам записывают в журнал, составленный по форме № 4 (прил. 2). Относительные деформации усадки образца $\varepsilon_s(t, t_w)$ определяют по результатам наблюдений в соответствии с требованиями пп. 5.1, 5.2 ГОСТ 24544–81.

3.73. По данным наблюдений за образцами с учетом показаний приборов на температурных эталонах строятся кривые их усадки во времени до ее равновесного значения (см. рис. 2 прил. 3). На этом графике отмечается также расчетная предельная величина усадки, определяемая в соответствии с рекомендациями п. 3.79.

3.74. Равновесной **влажностью бетона** называется его влажность после естественного высыхания образцов на воздухе до постоянной массы. Постоянство массы образцов должно быть зафиксировано трижды на трех последних взвешиваниях с интервалом в одну неделю. Во время трех последних взвешиваний обязательно должны быть измерены температура и относительная влажность воздуха в помещении.

3.75. Для определения содержания влаги в бетоне необходимо взвешивание образцов. Взвешивание должно производиться в те же сроки, что и измерение деформаций усадки, на образцовых технических весах первого класса точности и с помощью разновесов первого класса точности. Не рекомендуется использовать торговые весы и гири, так как они не обладают требуемой точностью. По результатам взвешивания и последующего расчета влагопотерь, влажности керамзитобетона строятся кривые изменения их влажности по массе во времени до ее равновесного значения (см. рис. 4 прил. 3). На этом графике отмечается расчетная величина начальной влажности бетона по массе, определяемая в соответствии с п. 3.77

3.76. По данным наблюдений за образцами строится кривая зависимости относительных деформаций усадки этих образцов от уменьшения влажности бетона по массе до ее равновесного значения (см. рис. 5 прил. 3). На этом графике с помощью экстраполяции (см. п. 3.79) достраивается участок кривой, соответствующий досушиванию образцов до их массы в высушенном состоянии (см. п. 3.78)

3.77. Расчетная величина начальной влажности бетона W по массе определяется по формуле

$$W = (m_1 - m_0)/m_0, \qquad (5)$$

где m_1 — масса влажного образца при первом взвешивании (в начале эксперимента; г; m_0 – масса сухого образца, г.

3.78. Досушивание образцов до сухого состояния для определения их «сухой» массы m_0 рекомендуется производить при той же температуре воздуха над осушителем в эксикаторе.

Допускается досушивание образцов с применением методов экспресс-сушки при повышенных температурах. При этом температура сушки выше 60° С не рекомендуется, так как возможно необратимое разрушение некоторых кристаллогидратов цементного камня.

3.79. Расчетная предельная величина усадки керамзитобетона $\varepsilon_s(\infty, t_w)$ находится графически экстраполированием кривой относительной усадки (см. рис. 5 прил. 3) по вертикали, соответст-

вующей расчетной величине начальной влажности бетона по массе (см. п. 3.77).

Предельную величину деформаций усадки $\varepsilon_s(\infty, t_w)$ можно также определять построением диаграммы в осях Δt; $\Delta t/\varepsilon_s(t, t_w)$ в соответствии с требованиями п. 5.6 ГОСТ 24544–81.

3.80. Коэффициент линейной усадки бетона β представляет собой относительную деформацию усадки, вызываемую уменьшением его влажности по массе на единицу при равномерном высыхании. Он определяется как тангенс угла наклона кривой относительных деформаций усадки керамзитобетона к оси изменений его влажности по массе $\beta = \operatorname{tg}\alpha$ (см. рис. 5 прил. 3).

3.81. Результаты обработки экспериментальных данных рекомендуется аппроксимировать надлежащими аналитическими выражениями в зависимости от целей эксперимента. Зависимость текущих относительных деформаций усадки от времени наблюдений рекомендуется описывать выражением

$$\varepsilon_s(t, t_w) = \varepsilon_s(\infty, t_w)\left[1 - e^{\alpha_s(t - t_w)}\right], \qquad (6)$$

где α_s — параметр, подбираемый по опытным данным из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных кривых.

Определение деформаций ползучести керамзитобетона и обработка экспериментальных данных

3.82. Загружение образцов и измерение деформаций ползучести следует осуществлять, как правило, при достижении бетоном проектной прочности на сжатие, т. е. в возрасте $t_0 = 28$ сут. В случае необходимости испытания можно начинать и в другие сроки, предусматриваемые программой исследований. После окончания нагружения отсчеты по приборам рекомендуется брать через $^1/_2$, 1, 3, 6 и 12 ч, в последующие 6 сут — ежедневно, с 7 по 15-е сут — через день, в последующие 45 сут — 2 раза в неделю, затем до 180 сут — 1 раз в неделю и далее, до конца исследований, как правило, 2 раза в месяц. При этом должны быть обязательно сняты отсчеты по приборам через $^1/_2$ и 3 ч, а также через 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 180, 270, 360, 480, 600 и 720 сут после нагружения.

На ненагруженных образцах-близнецах измерения деформаций производят в те же сроки, что и на нагруженных.

3.83. Отсчеты по приборам в процессе загружения записывают в журнал, составленный по форме № 5 (прил. 2), а результаты наблюдений за длительными деформациями образцов — в журнал по форме № 7 (прил. 2). Относительные полные деформации загруженных образцов, а также деформации ползучести $\varepsilon_c(t, t_0)$ определяют в соответствии с требованиями пп. 5.1—5.5 ГОСТ 24544–81*. Результаты всех вычислений записывают в журнал, составленный по форме № 6 и 8 (прил. 2). Там же записывают значения параметров ползучести бетона (см. пп. 3.7 и 3.8).

3.84. При кратковременных испытаниях контрольных образцов-близнецов (см. пп. 3.68—3.70) получают данные, характеризующие изменение физико-механических характеристик исследуемого бетона во времени. После оценки надежности и достоверности этих данных (см. пп. 5.1—5.10) строят соответствующие кривые зависимости прочности и модуля упругости от возраста бетона.

3.85. Для каждой серии образцов, загруженных длительной нагрузкой, строят кривую зависимости удельных деформаций ползучести или относительных деформаций ползучести от времени (см. рис. 6—8 прил. 3).

Полученные зависимости аппроксимируют с помощью надлежащего аналитического выражения.

3.86. Предельное значение удельной деформации ползучести $C(\infty, t_0)$ или относительной деформации ползучести $\varepsilon_c(\infty, t_0)$ определяют построением диаграммы в осях Δt, $\Delta t/C(t, t_0)$ или $\Delta t/\varepsilon_c(t, t_0)$ в соответствии с ГОСТ 24544—81*.

3.87. Для аппроксимации кривых линейных удельных деформаций ползучести керамзитобетона на карбонатном песке молодого возраста с физико-механическими свойствами, неинвариантными относительно начала загружения, рекомендуется применять выражение

$$C(t, t_0) = C(\infty, t_0)\,[1 - ke^{-\gamma_1 (t - t_0)}], \qquad (7)$$

где k и γ_1 — параметры, подбираемые по опытным данным из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных кривых.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ УСАДКИ И ПОЛЗУЧЕСТИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ И ПОТЕРЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АРМАТУРЕ

4.1. Математико-статистические методы при изучении усадки ползучести и потерь предварительного напряжения от них в арматуре рекомендуется применять в следующих случаях:

при обработке результатов традиционно поставленных («пассивных») экспериментов с целью оценки их надежности и достоверности — первый случай;

для получения и статистического анализа математических моделей, отражающих зависимость параметров, численно характеризующих исследуемые явления (усадка, ползучесть, потери предварительного напряжения)- и позволяющих прогнозировать величины этих параметров в зависимости от предварительно выбранных факторов и их взаимодействий — второй случай.

4.2. В первом случае используют простейшие статистические оценки совокупностей экспериментальных данных. Методика определения этих оценок приведена в п. 5 настоящих Рекомендаций.

4.3. Во втором случае используют факторный регрессионный или дисперсионный анализ, обрабатывая результаты как «пассивного» эксперимента, так и «активного», поставленного по заранее составленной схеме (плану), обладающей оптимальными свойствами с точки зрения объема экспериментальных работ и статистических требований.

Постановка, проведение и обработка результатов активного эксперимента основаны на методах математической теории эксперимента (МТЭ), позволяющих достигнуть намеченной цели в кратчайшие сроки и при минимальных затратах.

Эти методы особенно эффективны при исследовании бетонов на новых видах заполнителей, влияние которых на длительные процессы изучено недостаточно.

4.4. При использовании методов МТЭ для экспериментального изучения усадки, ползучести и суммарных потерь предварительного напряжения от них рекомендуется применять компактные статистические планы Бокса-Бенкена второго порядка для двух или трех факторов, варьируемых на трех уровнях (соответственно планы типа 3^2 и 3^3). Из плана типа 3^3 при фиксировании любого из трех факторов на постоянном уровне можно получить план типа 3^2. Указанная особенность таких планов позволяет в рамках одного эксперимента изучать усадку и ползучесть керамзитобетона. План типа 3^2 (табл. 4, выделенный участок) рекомендуется для изучения усадки, план типа 3^3 (табл. 4) — для изучения ползучести, а

Таблица 4

Номер строки плана	Факторы		
	X_1	X_2	X_3
8—11	±1	±1	0
13, 14, 2, 3	±1	0	±1
15, 12, 4, 1	0	±1	±1
5—7	0	0	0

оба плана — для изучения потерь предварительного напряжения. Обработка результатов поставленного таким образом эксперимента проводится методом регрессионного анализа, который включает в себя построение уравнения регрессии (математической модели) объекта исследования (усадка, ползучесть) (4.23) и статистический анализ этого уравнения (пп. 4.24—4.27).

При использовании методов МТЭ для экспериментального изучения потерь предварительного напряжения в арматуре рекомендуется применять двухфакторный план (см. табл. 10) с одинаковым или разным числом уровней варьирования факторов в зависимости от поставленной в эксперименте задачи. Обработка результатов поставленного таким образом эксперимента проводится методом дисперсионного анализа, который в данном случае включает в себя оценку существенности влияния назначенных факторов и их взаимодействия на изучаемый параметр (потери предварительного напряжения).

4.5. При назначении факторов следует исходить из поставленной в эксперименте задачи, выбирая в качестве варьируемых те факторы, влияние которых на исследуемое явление намечено изучить (п. 3).

4.6 В качестве основных факторов, влияние которых на усадку, ползучесть керамзитобетона и потери предварительного напряжения в арматуре следует изучить в первую очередь, рекомендуется принимать некоррелированные технологические факторы состава (независимые переменные), варьируя которыми можно в значительной степени влиять на прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона.

4.7. В качестве факторов, влияние которых на ползучесть и потери предварительного напряжения следует изучить в первую очередь, помимо основных технологических факторов либо вместо них, рекомендуется принимать дополнительные — уровень обжатия и величину внешней нагрузки.

4.8. Факторы и рекомендуемые значения интервалов их варьирования приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п. п.	Группы факторов	Наименование факторов (кодированное обозначение)	Интервалы варьирования
1	Основные технологические факторы	Расход цемента Ц, кг/м³, или класс керамзитобетона по прочности на сжатие В (X_1)	20—30% расхода на основном уровне
2	То же	Агрегатно-структурный фактор $M/(M+K)$ X_2	До 50% значения основного уровня
3	Дополнительный фактор (при изучении ползучести)	Уровень обжатия η (X_3)	40—60% значения основного уровня
4	То же	Уровень обжатия X_3 либо X_2	60—80% значения на основном уровне
5	»	Величина внешней нагрузки X_3 либо X_2	В зависимости от поставленной задачи

4.9. Уровни варьирования факторов, указанных в табл. 5, следует назначать по результатам предварительных опытов исходя из условия их совместности.

4.10. После назначения уровней варьирования переходят от натуральных значений факторов на уровнях к соответствующим кодированным. Условия кодирования задаются соотношением

$$x_i = (X_i - X_0)/\Delta X, \qquad (8)$$

где X_0 — натуральное значение фактора на основном уровне; x_i — кодированное значение фактора; X_i — натуральное значение фактора на верхнем и нижнем уровне; ΔX — интервал варьирования фактора.

4.11. Варьируя расход цемента (табл. 5) при постоянном расходе воды, можно получить некий (заданный) диапазон прочности составов керамзитобетона.

4.12. В рамках предлагаемой методики исследования сорт, активность и минералогический состав цемента, зерновой состав и

Таблица 6

Контролируемые параметры					Общий вид математических моделей, описывающих контролируемые параметры
Характеристики	Назначение	Наименование	Обозначение	№ п. п.	
Основные	Изучение ползучести	Относительные деформации ползучести.	$\varepsilon_c(t, t_0)$	1	$y[\ldots]=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+$ $+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3+b_{11}x_1^2+$ $+b_{22}x_2^2+b_{33}x_3^2$ (9)
			$C(t, t_0)$	2	
		Удельные деформации ползучести	$C^*(t, t_0)$	3	
	Изучение потерь	Суммарные потери предварительного напряжения от ползучести и усадки	$\sigma_e(t, t_0)$	4	Модель (9) и (10)
	Изучение усадки	Относительные деформации усадки	$\varepsilon_s(t, t_0)$	5	
Дополнительные	Изучение свойств, сопутствующих параметрам № 1—5	Кубиковая прочность в возрасте 28 сут	R_{28}	6	$y[\ldots]=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_{12}x_1x_2+$ $+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2$ (10)
		Призменная прочность в момент загружения длительной нагрузкой	$R_{bn}(t_0)$	7	
		Начальный модуль упругости в возрастах t_i	$E_b(t_i)$	8	

прочность заполнителей, продолжительность перемешивания и способ уплотнения смеси, масштабный фактор, возраст бетона к моменту начала отсчета деформаций, условия твердения и другие факторы следует удерживать на постоянном уровне, считая их влияние на исследуемые характеристики не основным (вторичным).

4.13. При необходимости учета указанных факторов, комплектуя план эксперимента опытными образцами, допускается для каждого опыта (строки плана) предусматривать дублирующие образцы для варьирования факторов, указанных в п. 4.12.

При этом следует учитывать, что резкое увеличение объема эксперимента в этом случае увеличивает продолжительность подготовительных работ.

4.14. Влияние условий внешней среды (температура, влажность) в период подготовки эксперимента следует свести к минимуму, что в известной степени достигается применением рекомендуемых статистических планов, удовлетворяющих условию компактности, т. е. в каждом опыте плана малое количество образцов (п. 4.4).

Кроме того, опытные образцы рекомендуется изготовлять по составам (замесам). В каждом замесе технологические факторы зафиксированы на постоянном уровне.

4.15. Качественный контроль возможных изменений температурно-влажностного режима в процессе эксперимента обязателен и должен проводиться по методике, изложенной в пп. 3.13—3.15.

4.16. В соответствии с задачей исследования в качестве контролируемых рекомендуется принимать приведенные в табл. 6 соответствующие основные параметры № 1—5. Для контроля и анализа существующих характеристик прочности и деформативности следует принимать дополнительные контролируемые параметры № 6—8 (табл. 6).

4.17. Учитывая особенности рекомендуемых статистических планов Бокса-Бенкена для получения характеристик контролируемых параметров, допускается планировать эксперимент с одним образцом в каждой строке плана. Однако для повышения точности результатов рекомендуется ставить параллельные опыты во всех строках плана. Рекомендуемое количество образцов для получения указанных выше характеристик в зависимости от состава приведено в табл 7

Таблица 7

№ контролируемого параметра (по табл. 6)	Рекомендуемое количество образцов № состава								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1, 2, 3	4	4	2	2	2	2	4	4	4
4	2	4	2	2	2	2	2	2	2
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	2	3	2	2	2	2	2	2	2
7,8	2	3	1	1	1	1	2	2	2

Дополнительно к указанным в табл. 7 образцам из керамзитобетона 1-го состава изготовляется три образца — температурные эталоны (п. 3.29).

4.18. При изготовлении опытных образцов должны соблюдаться требования, изложенные в пп. 3.16—3.27.

4.19. Методика экспериментального определения контролируемых параметров изложена в п. 3.

4.20. Испытания соответствующих опытных образцов для получения сопутствующих параметров следует проводить согласно пп. 3.68—3.70.

4.21. Для обработки полученных результатов для каждого контролируемого параметра составляется расчетная матрица (табл. 8).

4.22. Для расчета плана 3^2 расчетная матрица преобразуется исключением из табл. 8 гр. 4, 6, 7, 10.

4.23. Расчеты сводятся к получению математических моделей, общий вид которых представлен в табл. 6. В этих моделях (уравнениях регрессии):

x_1, x_2, x_3 — кодированные значения варьируемых факторов (члены уравнения регрессии); b_0, $b_{i(j)}$ b_{ii}, b_{ij} — коэффициенты при членах уравнения регрессии, получаемые методом наименьших квадратов,

где

$$b_0 = \sum_1^{n_0} y_{0u}/n_0; \tag{11}$$

$$b_{i(j)} = T_3[i(j)y]; \tag{12}$$

$$b_{ii} = T_4(iiy) + T_5 \sum_{n=1}^{k} (iiy) - T_2(0\,y); \tag{13}$$

$$b_{ij} = T_6(iiy), \tag{14}$$

где T_2—T_6 — постоянные коэффициенты (константы), принимаемые по табл. 9; $[i(j)y]$, (ijy), (iiy), $(0y)$ — соответствующие суммы, определяемые по расчетной матрице (табл. 8); n_0, y_{0u} — соответственно, количество "нулевых" точек плана и значение контролируемого параметра в u-й "нулевой" точке; y_{05}, y_{06}, y_{07} — значения контролируемых параметров в этих точках (строки № 5, 6, 7 табл. 8).

4.24. После завершения расчетов для каждого из полученных уравнений регрессии проводится статистический анализ, который в данном случае включает в себя оценку значимости коэффициентов при членах регрессии и проверку адекватности уравнения регрессии экспериментальным данным.

4.25. Оценка значимости коэффициентов производится по t-критерию Стьюдента. Соответствующие вычисления выполняются в следующей последовательности:

а) по результатам экспериментов в «нулевых» точках плана определяется дисперсия воспроизводимости контролируемого параметра (ошибка эксперимента)

$$S^2_э = \sum_1^{n_0} (y_{0u} - y_0)^2/f_э, \tag{15}$$

где y_0 — среднеарифметическое значение контролируемого параметра по

"нулевым" точкам плана; $f_э$ – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости;

б) по нижеприведенным формулам определяются среднеквадратические отклонения (ошибки) коэффициентов уравнения регрессии

$$S_{b_0}=T_7\sqrt{S^2_э}; \tag{16}$$

$$S_{b_i}=T_8\sqrt{S^2_э}; \tag{17}$$

$$S_{b_{ii}}=T_9\sqrt{S^2_э}, \tag{18}$$

$$S_{b_{ij}}=T_{10}\sqrt{S^2_э}; \tag{19}$$

где T_7—T_{10} — постоянные коэффициенты (константы), принимаемые по табл. 9;

в) расчетные значения $t^р$ -критерия Стьюдента определяются для каждого коэффициента уравнения регрессии по формулам:

$$t^р_{b_0}=|b_0|/S_{b_р}; \tag{20}$$

$$t^р_{b_i}=|b_i|/S_{b_i}; \tag{21}$$

$$t^р_{b_{ii}}=|b_{ii}|/S_{b_{ii}}; \tag{22}$$

$$t^р_{b_{ij}}=|b_{ij}|/S_{b_{ij}}. \tag{23}$$

Определение следует начинать с наименьших по абсолютному значению коэффициентов.

4.26. Если для заданного уровня значимости (рекомендуется принимать $\alpha=0{,}05$) при числе степеней свободы $f_0=n_0-1$

$$t^р>t^{табл}, \tag{24}$$

то проверяемый коэффициент признается значимым ($t^{табл}$ — табличное значение критерия Стьюдента, принимаемое по прил. 6). При невыполнении неравенства (24) соответствующий коэффициент незначим и может быть исключен из уравнения регрессии. Коэффициенты при квадратичных членах допускается оставлять в уравнении, даже если они незначимы. Это позволяет избежать дополнительных вычислений, связанных с пересчетом значимых коэффициентов уравнения регрессии.

4.27. После проверки значимости коэффициентов производится проверка адекватности каждого откорректированного (с учетом значимых коэффициентов) уравнения регрессии. Соответствующие вычисления выполняются в следующей последовательности:

а) по экспериментальным и теоретическим значениям контролируемого параметра (в каждой точке матрицы) определяется остаточная сумма квадратов

$$S_{ост}=\sum_{u=1}^{15}(\hat{y}-y_u)^2, \tag{25}$$

где y_u и $\hat{y}$ — соответственно экспериментальное и теоретическое значения контролируемого параметра в u-й точке плана;

Таблица 8

№ строки (опыта)	Линейные эффекты			Эффекты взаимодействия			Квадратичные эффекты			Значения контролируемого параметра		$(\hat{y}_u - y_u)$	$(\hat{y}_u - y_u)^2$
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x^2_1	x^2_2	x^2_3	опытные $y_u[\ldots]$	расчетные $\hat{y}_u[\ldots]$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	—	—	0	0	+	0	+	+	y_1	$\hat{y}_1$	$\hat{y}_1 - y_1$	$(\hat{y}_1 - y_1)^2$
2	+	0	—	0	—	0	+	0	+	y_2	$\hat{y}_2$	$\hat{y}_2 - y_2$	$(\hat{y}_2 - y_2)^2$
3	—	0	—	0	+	0	+	0	+	y_3	$\hat{y}_3$	$\hat{y}_3 - y_3$	$(\hat{y}_3 - y_3)^2$
4	0	+	—	0	0	—	0	+	+	y_4	$\hat{y}_4$	$\hat{y}_4 - y_4$	$(\hat{y}_4 - y_4)^2$
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_5	$\hat{y}_5$	$\hat{y}_5 - y_5$	$(\hat{y}_5 - y_5)^2$
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_6	$\hat{y}_6$	$\hat{y}_6 - y_6$	$(\hat{y}_6 - y_6)^2$
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_7	$\hat{y}_7$	$\hat{y}_7 - y_7$	$(\hat{y}_7 - y_7)^2$
8	+	+	0	+	0	0	+	+	0	y_8	$\hat{y}_8$	$\hat{y}_8 - y_8$	$(\hat{y}_8 - y_8)^2$
9	+	—	0	—	0	0	+	+	0	y_9	$\hat{y}_9$	$\hat{y}_9 - y_9$	$(\hat{y}_9 - y_9)^2$

10	—	+	0	—	0	0	+	+	0	y_{10}	$\hat{y}_{10}$	$\hat{y}_{10}-y_{10}$	$(\hat{y}_{10}-y_{10})^2$
11	—	—	0	+	0	0	+	+	0	y_{11}	$\hat{y}_{11}$	$\hat{y}_{11}-y_{11}$	$(\hat{y}_{11}-y_{11})^2$
12	0	—	+	0	0	—	0	+	+	y_{12}	$\hat{y}_{12}$	$\hat{y}_{12}-y_{12}$	$(\hat{y}_{12}-y_{12})^2$
13	+	0	+	0	+	0	+	0	+	y_{13}	$\hat{y}_{13}$	$\hat{y}_{13}-y_{13}$	$(\hat{y}_{13}-y_{13})^2$
14	—	0	+	0	—	0	+	0	+	y_{14}	$\hat{y}_{14}$	$\hat{y}_{14}-y_{14}$	$(\hat{y}_{14}-y_{14})^2$
15	0	+	+	0	0	+	0	+	+	y_{15}	$\hat{y}_{15}$	$\hat{y}_{15}-y_{15}$	$(\hat{y}_{15}-y_{15})^2$

$$[i(j)y]=\sum_{u=1}^{15} x_{i(j)u}\,y_u;\quad (ijy)=\sum_{u=1}^{15} x_{iu}\,x_{ju}\,y_u;\qquad (iiy)=\sum_{u=1}^{15} x^2_{iu};\qquad (0y)=\sum_{u=1}^{15} y_u;\qquad \sum_{u=1}^{15}(\hat{y}_u-y_u)^2,$$

где u — номер строки матрицы плана.

Таблица 9

Число факторов	Общее число точек плана	Число нулевых точек	Значения констант								
			T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
3 (2)	15	3	0,1667	0,125	0,25	0,625	0,25	0,5774	0,3536	0,5204	0,5

б) принимая $S_{ост} = S_{ад} + S_э$, определяется дисперсия адекватности

$$S^2_{ад} = S_{ост} - S_э / f_{ад}, \quad (26)$$

где $S_э$ — сумма квадратов отклонений теоретических и экспериментальных значений контролируемого параметра в «нулевых» точках [числитель в формуле (15)]; $f_{ад} = N - L - (n_0 - 1)$ — число степеней свободы дисперсии адекватности. Здесь $N = 15$ — количество опытов (строк плана); L — число значимых коэффициентов при членах регрессии, включая b_0;

в) адекватность, выявляющая статистическую пригодность полученной математической модели (уравнение регрессии) для описания изучаемого явления (зависимости), проверяется путем сравнения дисперсий воспроизводимости и адекватности: для адекватной модели указанные дисперсии должны быть однородны.

Проверка статистической гипотезы об однородности осуществляется по F-критерию Фишера. Значение этого критерия, соответствующее экспериментальным данным, вычисляется по формуле

$$F^р = S^2_{ад} / S^2_э, \quad (27)$$

где

$$S^2_{ад} > S^2_э.$$

Если

$$F^р < F^{табл}, \quad (28)$$

то подтверждается гипотеза об однородности дисперсий: полученная математическая модель адекватно описывает результаты эксперимента (где $F^{табл}$ — табличное значение F-критерия при выбранном уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и степенях свободы $f_{ад}$ и $f_э$ принимается по прил. 7).

Если $S^2_{ад} \leqslant S_э$, тогда вывод об адекватности модели может быть сделан и без проверки условия (28);

г) если неравенство (28) не соблюдается, то гипотеза об однородности сравниваемых дисперсий отвергается — модель признается неадекватной. В этом случае рекомендуется повторить опыты, либо изменить интервалы варьирования, либо применить другой план и т. п.

4.28. По адекватным моделям проводится аналитическая и графическая интерпретация, анализируется влияние назначенных факторов (независимых переменных) на контролируемый параметр и др.

4.29. При использовании методики дисперсионного анализа для изучения потерь предварительного напряжения (п. 4.4) в качестве

исследуемых следует назначать в первую очередь факторы № 1, 2, 4, 5, указанные в табл. 5.

4.30. Диапазоны изменения варьируемых факторов назначают в соответствии с поставленной задачей с учетом технологических возможностей осуществления эксперимента.

Рекомендуемая в качестве примера матрица двухфакторного плана для исследования потерь предварительного напряжения арматуры приведена в табл. 10.

Таблица 10

Фактор «А» **	Уровни фактора «В» * в кодированных единицах		
	$B_1=-1$	$B_2=0$	$B_3=+1$
без обжатия			
$A_1=0$	A_1B_1	A_1B_2	A_1B_3
$A_2=-1$	A_2B_1	A_2B_2	A_2B_3
$A_3=0$	A_3B_1	A_3B_2	A_3B_3
$A_4=1$	A_4B_1	A_4B_2	A_4B_3

* При использовании в качестве опытных образцов центрально-армированных призм в качестве фактора «В» рекомендуется принимать класс бетона по прочности на сжатие. При использовании балок в качестве фактора «В» рекомендуется принимать внешнюю нагрузку со следующими уровнями: $B_1=-1$ — нагрузка отсутствует; $B_2=0$ — нагрузка загружения меньше нагрузки трещинообразования; $B_2=1$ — нагрузка загружения больше нагрузки трещинообразования.

** Уровень фактора $A=A_1$ (преднапряжение отсутствует) можно при необходимости устранить, оставив этот фактор на трех уровнях и приняв в качестве нижнего уровня ($A=-1$) уровень, соответствующий $\eta=0$ (предварительное напряжение отсутствует).

4.31. При проведении комплексных исследований усадки, ползучести и потерь предварительного напряжения от них при назначении уровней фактора В» (для возможности сопоставления результатов) рекомендуется использовать те же составы, что и при изучении усадки и ползучести (фактор X_1, X_2 — табл. 5).

В общем случае в пределах выбранного диапазона изменения каждого фактора уровни его варьирования могут быть назначены несимметрично относительно центра плана, с различным интервалом варьирования.

4.32. В рамках рекомендуемого плана (табл. 10) допускается при необходимости, помимо основных образцов (с варьированием назначенных по указаниям пп. 4.29, 4.30 факторов «А» и «В»), изготовлять дополнительные образцы (дублирующие основные по факторам «А» и «В»), в которых варьируются факторы, зафиксированные в основном эксперименте на постоянном уровне — процент армирования μ, агрегатно-структурный фактор $M/(M+K)$, вид мелкого заполнителя, марка цемента и т. д.

4.33. Допускается принимать по одному образцу для каждого опыта (ячейки плана, табл. 10).

4.34. Изготовление опытных образцов рекомендуется производить по составам, согласно рекомендациям п. 4.14 и по методике, изложенной в пп. 3.16—3.23, 3.27.

4.35. Испытания опытных образцов для получения основных контролируемых параметров должны проводиться по методике, соответствующей поставленной в эксперименте задачи.

4.36. Для получения сопутствующих параметров испытание соответствующих опытных образцов (п. 3) следует проводить согласно пп. 3.68—3.70, 4.20.

4.37. Дисперсионный анализ существенности влияния варьируемых на заданных уровнях факторов на контролируемый выход (потери преднапряжения в арматуре) рекомендуется проводить по однофакторной (I вариант) или двухфакторной (II вариант) схемам.

Предполагается, что результаты наблюдений можно представить математическими моделями:

для I варианта

$$\hat{y}=y+\alpha_i+e_{ij}; \tag{29}$$

для II варианта

$$\hat{y}=y+\alpha_i+\beta_j+e_{ij}, \tag{30}$$

где y — суммарный эффект факторов во всех опытах (среднее значение); α_i и β_j — эффекты факторов «А» и «В» соответственно на i-м и j-м уровнях; e_{ij} — ошибка измерения воспроизводимости, имеющая нормальное распределение, нулевое математическое ожидание и определенную дисперсию (вызвана действием всех неконтролируемых факторов).

4.38. *Двухфакторный дисперсионный анализ существенности влияния варьируемых факторов на потери предварительного напряжения в арматуре (II вариант) проводится в следующей последовательности:*

а) результаты испытаний заносят в специальную таблицу (матрицу эксперимента), по которой вычисляют средние значения выходов (табл. 11).

Для упрощения вычислений допускается из каждого наблюдаемого значения выхода вычитать одно и то же число c, примерно равное общей средней, и все последующие вычисления проводить с уменьшенными значениями выходов ($y_{ij}-c$);

б) для дисперсионного анализа рассчитываются суммы квадратов отклонений

$$S_A=\sum_{j=1}^{4}(y_j-y)^2; \tag{31}$$

$$S_B=\sum_{i=1}^{3}(y_i-y)^2, \tag{32}$$

где S_A и S_B — факторные суммы квадратов отклонений групповых средних от общей средней, соответственно для факторов «А» и «В».

Таблица 11

Фактор «А»	Уровни варьирования фактора «В»			Средние по строкам (группам)
	B_1	B_2	B_3	
A_1 (x_1)	y_{11}	y_{12}	y_{13}	$\frac{y_{11}+y_{12}+y_{13}}{3}=y_{1j}$
A_2 (x_2)	y_{21}	y_{22}	y_{23}	$\frac{y_{21}+y_{22}+y_{23}}{3}=y_{2j}$
A_3 (x_3)	y_{31}	y_{32}	y_{33}	$\frac{y_{31}+y_{32}+y_{33}}{3}=y_{3j}$
A_4 (x_4)	y_{41}	y_{42}	y_{43}	$\frac{y_{41}+y_{42}+y_{43}}{3}=y_{4j}$
Средние по графам (группам)	$y_{i1}=\frac{\sum_{i=1}^{4} y_{i1}}{4}$	$y_{i2}=\frac{\sum_{i=1}^{4} y_{i2}}{4}$	$y_{i3}=\frac{\sum_{i=1}^{4} y_{i3}}{4}$	Общее среднее $y=\frac{\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4} y_{ij}}{ij}$, где $ij=12$

$$S_{\text{общ}}=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}(y_{ij}-y)^2; \quad (33)$$

$$S_{\text{ост}}=S_{\text{общ}}-S_{\text{A}}-S_{\text{B}}, \quad (34)$$

где $S_{\text{общ}}$ — общая сумма квадратов отклонений выходов от общей средней; $S_{\text{ост}}$ — остаточная сумма квадратов отклонений выходов группы от своей групповой средней;

в) рассчитываются дисперсии

$$S^2_{\text{A}}=S_{\text{A}}/f_{\text{A}}; \quad (35)$$

$$S^2_{\text{B}}=S_{\text{B}}/f_{\text{B}}; \quad (36)$$

$$S^2_{\text{ост}}=S_{\text{ост}}/f_{\text{ост}}, \quad (37)$$

где f_{A}, f_{B}, $f_{\text{ост}}$ — числа степеней свободы для рассчитанных сумм квадратов отклонений, вычисляемые по формулам

$$f_{\text{A}}=i-1; \quad (38)$$

$$f_B = j-1; \quad (39)$$

$f_{ост} = i(j-1)$ (если рассматривается влияние фактора «А»); (40)

$f_{ост} = j(i-1)$ (если рассматривается влияние фактора «В»); (41)

г) результаты расчетов заносятся в таблицу дисперсионного анализа (табл. 12).

Таблица 12

Источник изменчивости	S	f	S^2	F^p *
Фактор «А»	S_A	$i-1$	S_A^2	$F_p^A = \frac{S_A^2}{S_{ост}^2}$
Фактор «В»	S_B	$j-1$	S_B^2	$F_p^B = \frac{S_B^2}{S_{ост}}$
Ошибка опыта	$S_{ост}$	$\begin{cases} i(j-1) \\ j(i-1) \end{cases}$	$S_{ост}^2$	

* F^p — расчетное значение F-критерия Фишера.

д) по прил. 7 определяются табличные значения F-критерия Фишера ($F_{табл}$) для факторов «А» и «В» со степенями свободы, равными: для числителя соответственно f_A или f_B, и для знаменателя $f_{ост}$ при заданном уровне значимости;

е) по результатам вычислений принимаются решения — если

$$F_p^A > F_{табл} \ (F_p^B > F_{табл}), \quad (42)$$

то различие между сравниваемыми дисперсиями значимо и факторы «А» и «В» (при заданных уровнях i и j) существенно влияют на контролируемый выход.

4.39. При исследовании существенности влияния одного выбранного фактора на потери предварительного напряжения в арматуре также рекомендуется проводить эксперимент по плану, матрица которого в качестве примера приведена в табл. 10 (выделенный участок). Дисперсионный анализ в этом случае проводится по однофакторной схеме (I вариант).

Результаты испытаний заносятся в матрицу эксперимента (табл. 11, выделенный участок). Расчеты проводятся по формулам (31), (33), (35), (37), (38), (40) в последовательности, указанной в п. 4.38 б—е.

Вместо формулы (34) используется формула

$$S_{ост} = S_{общ} - S_{A(B)} \quad (43)$$

4.40. Если соблюдается условие (42), при необходимости, используя метод наименьших квадратов, по результатам однофакторного дисперсионного анализа можно получить математическую модель (уравнение регрессии) вида

$$y=b_0+b_1x, \tag{44}$$

где b_0 и b_1 — коэффициенты при членах уравнения регрессии; являются оценками y и α_l в математической модели (29) и определяются по формулам:

$$b_0=(\sum_{i=1}^{n} x^2_i \sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} x_i y_i)/[n \sum_{i=1}^{n} x^2_i - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2]; \tag{45}$$

$$b_1=(n \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i)/[n \sum_{i=1}^{n} x^2_i - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2], \tag{46}$$

где соответствующие значения переменных взяты из расчетной табл. 13.

Таблица 13

Уровни варьируемого фактора x_i	Значения контролируемого выхода y_i	x^2_i	y^2_i	$x_i y_i$	x_i+y_i	$(x_i+y_i)^2$
x_1	y_1	x_1^2	y_1^2	x_1y_1	x_1+y_1	$(x_1+y_1)^2$
x_2	y_2	x_2^2	y_2^2	x_2y_2	x_2+y_2	$(x_2+y_2)^2$
x_3	y_3	x_3^2	y_3^2	x_3y_3	x_3+y_3	$(x_3+y_3)^2$
x_4	y_4	x_1^2	y_4^2	x_4y_4	x_4+y_4	$(x_4+y_4)^2$
.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.		
.	.	.	.			
x_n	y_n	x^2_n	y^2_n	$x_n\ y_n$	x_n+y_n	$(x_n+y_n)^2$
$\sum_{i=1}^{n} x_i$	$\sum_{i=1}^{n} y_i$	$\sum_{i=1}^{n} x_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} y_i^2$	$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i$	$\sum_{i=1}^{n}(x_i+y_i)$	$\sum_{i=1}^{n}(x_i+y_i)^2$

4.41. При отыскании коэффициентов нелинейных уравнений регрессии (в зависимости от требуемой точности аппроксимации) рекомендуется привести их к линейному виду путем замены переменных (табл. 14).

Таблица 14

№ п. п.	Исходная функция y	Преобразованная функция y	Замена переменных
1	$y=A\,e^{kx}$	$y'=a_0+a_1x$	$y'=ln\,y$; $a_0=ln\,A$; $a_1=k$
2	$y=B\,x^B$	$y'=a_0+a_1x$	$y'=lg\,y$; $u=lg\,x$;
3	$y=a_0+a/x$	$y'=a_0+a_1u$	$y'=1/x$;
4	$y=a_0+a/x$	$y'=a_0+au$	$y'=1/x^B$

4.42. Для проверки правильности вычислений в табл. 13 рекомендуется использовать выражение

$$\Sigma(x+y)^2=\Sigma x^2+2\Sigma xy+\Sigma y^2. \qquad (47)$$

Значения сумм Σ из табл. 13 подставляются в выражение (47). Вычисления выполнены правильно, если тождество (47) соблюдается.

4.43. Значимость (адекватность) полученного уравнения регрессии (44) определена условием (42).

4.44. Значимость коэффициентов b_0 и b_1 можно определять двумя равноценными способами: проверкой по t-критерию Стьюдента (п. 4.25) или построением доверительных интервалов. Учитывая, что опытные данные получены по результатам полного факторного эксперимента (п. 4.30) и зависят только от погрешности измерений и числа опытов, доверительные интервалы указанных коэффициентов допускается принимать равными друг другу. При этом дисперсия коэффициента регрессии определяется по формуле

$$S_B^2 = S_{A(B)}^2/n, \qquad (48)$$

где $S_{A(B)}^2$ — дисперсия, вычисленная по формуле (35) или (36).

4.45. Доверительный интервал для коэффициентов определяется по формуле

$$\Delta b_{0(1)} = \pm t\sqrt{S_B^2}, \qquad (49)$$

где t — табличное значение t-критерия Стьюдента, принимаемое по прил. 6 при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f_A или f_B (см. п. 4.38 в).

4.46. Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала, т. е. если его средняя величина больше, чем разбросы за счет неточности модели и влияния неконтролируемых факторов.

4.47. При использовании методик регрессионного и дисперсионного анализов для обработки результатов «пассивного» эксперимента должны соблюдаться следующие условия:

а) выходная переменная y — случайная величина с нормальным распределением; варьируемые факторы $x_1, \ldots, x_n$ — неслучайные величины, т. е. измеряются с пренебрежимо малой ошибкой

по сравнению с ошибкой измерения y; тогда из-за случайных ошибок измерения y и воздействия на объект помимо $x_1, \ldots, x_n$ еще неконтролируемых факторов функциональная зависимость $y=\varphi(x_1, \ldots, x_n)$ будет представлять не точную связь между входом (x) и выходом (y), а только связь между входом и математическим ожиданием случайной величины $M(y)=\varphi(x_1, \ldots, x_n)$;

б) связь между варьируемыми факторами отсутствует, т. е. факторы не коррелированы;

в) дисперсии выхода однородны (равноточны) в любой точке эксперимента, т. е. соответствуют одной и той же генеральной совокупности;

г) исследуемый объект лишен динамических свойств — рассматриваются стационарные режимы объекта.

4.48. Проверка условий, приведенных в п. 4.47 б, г, проводится путем анализа имеющихся экспериментальных данных, условий постановки и проведения эксперимента.

4.49. Проверка условия нормальности распределения экспериментальных результатов (4.47а) осуществляется по существующим стандартным методикам. В случае несоблюдения этого условия путем соответствующих преобразований можно привести имеющиеся распределения к нормальному. Методики проверки нормальности распределения экспериментальных данных, а также способы преобразования имеющегося распределения к нормальному описаны во многих пособиях по прикладной математической статистике.

4.50. *Условие однородности дисперсий (4.47в) является одним* из важнейших при статистическом анализе и моделировании. Проверяется это условие по σ-критерию Кохрена (для анализа n дисперсий с одинаковым числом степеней свободы) и по B-критерию Бартлетта (для анализа n дисперсий с различным числом степеней свободы). Для выполнения этой проверки результаты «пассивного» эксперимента или серии экспериментов объединяются в группы по заданным признакам и заносятся в расчетную таблицу (табл. 15).

Таблица 15

Номер группы	Номер и результат измерений						Число измерений	Среднее	Дисперсия
	1	2	..	j	...	m			
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1j}	...	y_{1m}	m_1	y_1	S_1^2
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2j}	...	y_{2m}	m_2	y_2	S_2^2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
i	y_{i1}	y_{i2}	...	y_{ij}	...	y_{im}	m_i	y_i	S^2_i
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
k	y_{k1}	y_{k2}	...	y_{kj}	...	y_{km}	m_k	y_k	S^2_k

4.51. Расчетное значение B-критерия Барглетта определяется по формуле

$$B^{\text{расч}} = (2{,}303/c)\left[\left(\sum_{i=1}^{k} f_i\right)\lg S^{-2} - \sum_{i=1}^{k}(f_i \lg S^2{}_i)\right], \quad (50)$$

где

$$c = 1 + [1/3(k-1)]\left[\sum_{i=1}^{k} 1/f_i - 1/\sum_{i=1}^{k} f_i\right]; \quad (51)$$

$$\overline{S} = \left(\sum_{i=1}^{k} f_i S^2{}_i\right) : \sum_{i=1}^{k} f_i; \quad (52)$$

$$f_i = m_i - 1 \neq \text{const}. \quad (53)$$

Величина $B^{\text{расч}}$ приближенно распределена как χ^2 с числом степеней свободы $k-1$ ($f_i > 2$) при выбранном уровне значимости. Если

$$B^{\text{расч}} < \chi^2, \quad (54)$$

то условие (4.47в) соблюдается (χ^2 принимается по прил. 9).

4.52. Расчетное значение σ-критерия Кохрена ($m = \text{const}$) вычисляется по формуле

$$\sigma^{\text{расч}} = S^2_{\max} / \left(\sum_{i=1}^{k} S^2{}_i\right), \quad (55)$$

где $S^2_{\max}$ — максимальная дисперсия в ряду n из вычисленных в табл. 15.

Если

$$\sigma^{\text{расч}} < \sigma^{\text{табл}}, \quad (56)$$

то условие (4.47в) соблюдается ($\sigma^{\text{табл}}$ определяется по прил. 8 при выбранном уровне значимости с числом степеней свободы для максимальной дисперсии $f_i = m_i - 1$ и количестве суммируемых дисперсий k).

4.53. При соблюдени условий, приведенных в п. 4.47 а — г, в зависимости от поставленной в исследовании задачи принимается решение об использовании методики регрессионного или дисперсионного анализов для обработки представленных в табл. 12 экспериментальных данных.

При этом парный (линейный и нелинейный) регрессионный анализ результатов «пассивного» эксперимента рекомендуется проводить по методике, изложенной в пп. 4.40—4.46.

Множественный (линейный или нелинейный) регрессионный анализ результатов «пассивного» эксперимента рекомендуется проводить по методикам, изложенным в пособиях, указанных в п. 4.49.

4.54. Дисперсионный анализ результатов «пассивного» эксперимента рекомендуется проводить по методике, изложенной в пп. 4.29—4.39.

5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

5.1. Результаты «пассивных» экспериментов по исследованию деформаций усадки, ползучести, потерь предварительного напряжения от них и сопутствующих физико-механических характеристик

керамзитобетона на карбонатном песке, если для их обработки не используются методы регрессионного и дисперсионного анализов (пп. 4.47—4.54), должны оцениваться с точки зрения их надежности и достоверности. Для этой цели используются методы математической статистики, применение которых предполагает, что рассматриваемые данные подчиняются закону нормального распределения.

Проверка условия нормальности распределения результатов эксперимента и соответствующие преобразования (при необходимости) проводятся согласно п. 4.49.

5.2. Количественная оценка нормально распределенных экспериментальных данных производится по их средней величине (среднеарифметическое), ее изменчивости (среднеквадратическое отклонение) и точности ее определения (средняя ошибка среднеарифметического).

Кроме этих основных параметров, при необходимости, используют коэффициент изменчивости, показатель точности, средние значения ошибок других статистических характеристик.

5.3. Среднеарифметическое значение y изучаемой характеристики представляет собой наиболее вероятное значение измеряемой величины для рассматриваемой группы наблюдений (образцов) и вычисляется по формуле

$$y=\sum_{i=1}^{n} y_i/n, \qquad (57)$$

где y_i — отдельные значения наблюдаемой величины; n — число наблюдений в группе.

5.4. Среднеквадратическое отклонение S, характеризующее изменчивость среднеарифметического значения изучаемой характеристики, вычисляется по формуле

$$S=\pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2/(n-1)}. \qquad (58)$$

Вычисленное значение S позволяет установить количество измерений (образцов), входящее в заданные пределы отклонений.

5.5. Средняя ошибка m среднего арифметического значения изучаемой характеристики, оценивающая точность его определения, вычисляется по формуле

$$m=\pm(S/\sqrt{n}). \qquad (59)$$

По вычисленному значению m можно судить о надежности полученного значения y, определив, какое количество, %, образцов должно находиться в пределах $y\pm m$; $y\pm 2m$; $y\pm 3m$.

Это позволяет сравнить между собой среднеарифметические значения двух групп измерений (образцов) изучаемого свойства и определить достоверность или случайность различия между ними.

5.6. Коэффициент c_v, характеризующий изменчивость нескольких величин, определяется по формуле

$$c_v=S/y. \qquad (60)$$

Если $c_{v_1}=S_1/y_1>c_{v_2}=S_2/y_2$, то изменчивость измеряемой вели-

чины 1-й группы (характеристика c_{v_1}) больше, чем изменчивость этой же величины 2-й группы (характеристика c_{v_2}).

5.7. Для оценки надежности результатов измерений рекомендуется использовать также величину показателя точности p, который вычисляется по формуле

$$p = m/y. \tag{61}$$

При сравнении нескольких групп измерений величины по показателю точности p наиболее надежные результаты получены в той группе, в которой значение p наименьшее.

При изучении указанных в п. 5.1 характеристик рекомендуется принимать в качестве достаточно надежных результаты экспериментов, для которых значение $p \leqslant 0{,}05$.

5.8. Если необходимо установить достоверность или случайность различных величин S, c_v и p, рекомендуется использовать средние ошибки этих величин m_S, m_{cv}, m_p, вычисляемые по формулам:

$$m_S = \pm 0{,}707m, \tag{62}$$

$$m_{cv} = \pm(\gamma/\sqrt{n}), \tag{63}$$

$$m_p = \pm p\sqrt{1/2n + (p/100)^2}, \tag{64}$$

где n — число наблюдений; S, c_v, p — оцениваемые статистические величины; принимаются в процентах; γ — статистический коэффициент, принимаемый по прил. 10 в зависимости от коэффициента изменчивости

$$\gamma = c_v\sqrt{0{,}5 + (c_v/100)^2}. \tag{65}$$

Достоверность или случайность различия двух сравниваемых величин $A_1(S_1, c_{v_1}, p_1)$ и $A_2(S_2, c_{v_2}, p_2)$ рекомендуется оценивать по следующим формулам:

при наличии корреляционной связи

$$(A_1 - A_2)/\sqrt{m_1^2 + m_2^2 - 2rm_1m_2} \geqslant 3 + 6/(n-4); \tag{66}$$

при отсутствии корреляционной связи

$$(A_1 - A_2)/\sqrt{m_1^2 + m_2^2} \geqslant 3 + 6/(n-4), \tag{67}$$

где r – коэффициент корреляции (п. 5.9).

5.9. При исследовании корреляционной зависимости изучаемой характеристики (п. 5.1) и факторов, влияющих на нее, используются значения коэффициента корреляции r или корреляционного отношения ρ, вычисляемые соответственно по формулам (68) и (69).

Коэффициент корреляции, определяющий тесноту линейной связи, вычисляется по формуле

$$r=\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-x)(y_i-y)\right]/\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x)^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2}. \quad (68)$$

Корреляционное отношение, определяющее тесноту нелинейной связи, вычисляется по формуле

$$\rho=\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2-\sum_{i=1}^{n}\Delta^2_i\right]/\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2}, \quad (69)$$

где x_i, y_i — отдельные значения соответственно переменной величины (фактора) и изучаемой характеристики; x, y — среднеарифметические значения этих параметров, Δ_i — отклонения отдельных измерений от их групповых средних, соответствующих определенным значениям другого признака.

Коэффициент корреляции r изменяется от 1 (положительная связь) до —1 (отрицательная связь). Точной линейной функциональной связи соответствует значение коэффициента корреляции, равное ± 1. При $r=0$ между x и y нет взаимосвязи.

Чем больше величина корреляционного отношения ρ, измеряемая в пределах от 1 до —1, тем теснее связь между x и y.

Корреляционное отношение ρ, как правило, больше коэффициента корреляции r. При строго линейной корреляции $\rho=r$.

5.10. Средние ошибки коэффициента корреляции r и корреляционного отношения ρ вычисляются соответственно по формулам:

$$m_r=\pm[(1-r^2)/\sqrt{n}], \quad (70)$$

$$m_\rho=\pm[(1-\rho^2)/\sqrt{n}], \quad (71)$$

где n — число взаимных пар наблюдений.

Для оценки достоверности корреляционной связи рекомендуется проверять условия:

для линейной связи

$$r/m_r\geqslant 4; \quad (72)$$

для нелинейной связи

$$\rho/m_\rho\geqslant 4. \quad (73)$$

При соблюдении указанных условий соответствующая связь (линейная или нелинейная) между x и y существует (достоверна) и доказана; в противном случае — связь отсутствует (недостоверна).

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСАДКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ

6.1. Деформации ползучести и усадки бетона оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций. Они приводят к появлению напряжений еще до приложения внешней нагрузки, увеличению деформаций конструкций под нагрузкой, перераспределению напряжений и усилий, к снижению величин предварительного напряжения.

6.2. Деформации ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке в большинстве случаев подчиняются закономерностям, присущим тяжелым и легким бетонам плотной структуры. При прочих равных условиях (составе, прочности, условиях созревания, возраста в момент загружения, уровне действующих напряжений) ползучесть такого бетона ниже, а усадка близка к соответствующим деформациям керамзитобетона на кварцевом песке.

6.3. Деформации ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке во многом зависят от конкретных физико-механических характеристик керамзита и карбонатного песка, отличающегося большим разнообразием кристаллической структуры.

6.4. Величину деформаций ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке можно регулировать путем рационального назначения компонентов состава и режима тепловлажностной обработки.

6.5. Вводимые в расчет класс бетона по прочности на сжатие В и нормативное значение призменной прочности R_{bn} керамзитобетона на карбонатном песке с обеспеченностью, равной 0,95, принимаются в соответствии с указаниями п. 6.7. Значения модуля упругости E_b, предельной меры ползучести $C^N(\infty, 28)$ и деформаций усадки $\varepsilon_s^N(\infty, 7)$, определяемые по формулам (77), (79), (81) и (82) или по табл. 17 и 18, принимаются среднестатистическими с обеспеченностью 0,95 и соответствуют базовым условиям по ГОСТ 24452—80 и ГОСТ 24544—81 с изм.

6.6. Для учета в расчетах влияния отклонений фактических условий изготовления, загружения и эксплуатации конструкций от базовых условий (возраста керамзитобетона в момент загружения или начала высыхания, размеров поперечного сечения элемента, температурно-влажностного режима окружающей среды, тепловлажностной обработки) числовые значения деформаций $C^N(\infty, 28)$ и $\varepsilon_s^N(\infty, 7)$, полученные согласно пп. 6.9 и 6.10 умножают на коэффициенты, приведенные в табл. 19, 20, 21.

6.7. Для установления средних значений кубиковой прочности бетона $R_b^N(t)$ или призменной прочности $R_{bn}^N(t)$ в любом возрасте t при нормальных условиях твердения рекомендуется пользоваться формулами

$$R_b^N(t) = [1+0{,}08(t-28)/(t+4)]\,(B/0{,}779), \qquad (74)$$

$$R_{bn}^N(t) = [1+0{,}08(t-28)/(t+4)]/(R_{bn}/0{,}779). \qquad (75)$$

Нормативное значение призменной прочности керамзитобетона на карбонатном песке принимают по табл. 1 настоящих Рекомендаций либо вычисляют по формуле

$$R_{bn} = (0{,}94 - 0{,}0026B)B, \qquad (76)$$

где B — класс бетона по прочности на сжатие в возрасте $t_0 = 28$ сут, МПа.

Гарантированные с обеспеченностью 0,95 значения кубиковой прочности и нормативные значения призменной прочности в зависимости от его класса и возраста приведены в табл. 16.

6.8. Значения начального модуля упругости керамзитобетона E_b в возрасте $t_0 = 28$ сут, а также в любом возрасте $E_b(t)$ при известных характеристиках бетона и уровня обжатия определяют по формулам:

для керамзитобетона естественного твердения

$$E_b = 2100\rho^2 \sqrt[3]{B}; \qquad (77)$$

$$E_b(t) = E_b/[0{,}94 + 0{,}17\eta C(t, t_0)10^5]; \qquad (78)$$

для керамзитобетона, подвергнутого тепловлажностной обработке:

$$E_b = 1900\rho^2 \sqrt[3]{B}; \qquad (79)$$

$$E_b(t) = E_b/[1 + 0{,}24\eta C(t, t_0)10^5], \qquad (80)$$

где ρ — плотность керамзитобетона, т/м³; η — относительный уровень обжатия; $C(t, t_0)$ — мера ползучести к моменту времени t, определяемая по формуле (86).

Если необходимые данные для расчета по формулам (77), (79) отсутствуют, значения E_b принимают по табл. 17.

6.9. Предельные значения меры ползучести керамзитобетона, загруженного в возрасте $t_0 = 28$ сут, после твердения в естественных условиях (при известных характеристиках состава бетона) вычисляют по формуле

$$C^N(\infty, 28) = (45/B)\sqrt{r\,W/Cm}\ \text{МПа}^{-1}, \qquad (81)$$

где W и Cm — удельные (по весу) количества соответственно воды затворения и цемента, кг/м³; $r = \text{М}/(\text{М}+\text{К})$ — значение агрегатно-структурного фактора.

6.10. Предельные значения относительных деформаций усадки керамзитобетона на карбонатном песке (при известных характеристиках состава бетона), подверженного высыханию после твердения во влажных условиях в течение $t_w = 7$ сут, вычисляют по формуле

$$\varepsilon_S^N(\infty, 7) = 1{,}45\sqrt{W\sqrt{Cmr}} \qquad (82)$$

Таблица 16

Возраст бетона, сут	Значения $B(t)$ и $R_{bn}(t)$, МПа, в зависимости от возраста бетона и его класса по прочности на сжатие					
	B10	B12,5	B15	B20	B25	B30
1	5,7	7,1	8,5	11,4	14,2	17,1
	5,2	6,4	7,7	10,1	12,5	14,7
3	7,1	8,9	10,7	14,3	17,8	21,4
	6,5	8,1	9,6	12,6	15,6	18,5
7	8,5	10,6	12,7	16,9	21,2	25,4
	7,7	9,6	11,4	15	18,5	22
28	10	12,5	15	20	25	30
	9,1	11,3	13,5	17,7	21,9	25,9
40	10,2	12,8	15,3	20,4	25,6	30,7
	9,3	11,5	13,8	18,1	21,4	26,5
60	10,4	13	15,6	20,8	26	31,2
	9,5	11,7	14,1	18,4	22,8	26,9
90	10,5	13,2	15,8	21,1	26,3	31,6
	9,6	11,9	14,2	18,6	23,1	27,2
180	10,7	13,3	16	21,3	26,6	32
	9,7	12	14,4	18,9	23,4	27,6
360	10,7	13,4	16,1	21,4	26,8	32,2
	9,8	12,1	14,5	19	23,5	27,8
720	10,8	13,5	16,1	21,5	26,9	32,3
	9,8	12,2	14,5	19,1	23,6	27,9
∞	11	13,7	16,5	22	27,5	33
	10	12,4	14,8	19,5	24,1	28,4

Примечания: 1. Над чертой приведены нормативные значения кубиковой прочности на сжатие в возрасте t; под чертой — нормативные значения призменной прочности $R_{bn}(t)$ в возрасте t.

2. Для бетона, изготовленного на быстротвердеющем цементе, значения, определяемые по формулам (74) и (75) или табл. 16, должны быть уменьшены: для $t=180$ сут — на 5%; $t=360$ сут — на 10%; $t=720$ сут на 15%.

6.11. Предельные значения $c^N(\infty, 28)$ и $\varepsilon_S^N(\infty, 7)$ для керамзитобетона на карбонатном песке при отсутствии данных о характеристиках состава бетона принимают по табл. 18.

Таблица 17

Вид бетона	Значения E_b, МПа, при классе бетона					
	В10	В12,5	В15	В20	В25	В30
Керамзитобетон на карбонатном песке	8950	12 475	14 945	17 450	21 000	22 315

Примечание. Для керамзитобетона, подвергнутого тепловлажностной обработке, значения E_b следует умножить на 0,9.

Таблица 18

Подвижность (удобоукладываемость) керамзитобетонной смеси		Значения $C^N(\infty, 28)\,10^4$, МПа$^{-1}$, для классов бетона						Значения $\varepsilon_S^N(\infty, 7)\times 10^5$ для классов бетона	
Осадка конуса, см	Жесткость, с	В10	В12,5	В15	В20	В25	В30	В10—В15	В20—В30
—	35—30	—	—	1,3	1,12	1,02	0,88	65	80
0—3	15—10	2	1,7	1,4	1,2	1,07	0,95	75	90
3—6	—	2,2	1,85	1,55	1,28	1,12	1	85	105
6—9	—	2,3	2,05	1,7	1,35	1,21	1,05	95	110

Примечание. Для керамзитобетона, подвергнутого тепловлажностной обработке, значения $C_S^N(\infty, 28)$ и $\varepsilon(\infty, 7)$, вычисленные по формулам (81) и (82) или принятые по табл. 18, следует умножить на 0,9. Кроме того, значения $C_S^N(\infty, 28)$, вычисляемые по формуле (81) или определяемые по табл. 18, необходимо:

для керамзитобетонов, изготовленных на пуццолановом портландцементе, — увеличить на 25%;

для керамзитобетонов, изготовленных на шлакопортландцементе, — увеличить на 25% при загружении их в условиях атмосферной влажности и уменьшить на 35% при загружении во влагонасыщенной среде.

6.12. Предельные значения меры ползучести $C(\infty, 28)$ и относительных деформаций усадки $\varepsilon_s(\infty, t_w)$ керамзитобетона на карбонатном песке, используемые в расчетах, в соответствии с п. 6.6, вычисляют по формулам

$$C(\infty, 28) = C^N(\infty, 28)\xi_2\xi_3, \qquad (83)$$

$$\varepsilon_s(\infty, t_w) = \varepsilon_S^N(\infty, \tau)\,\xi_1\xi_2\xi_3, \qquad (84)$$

где ξ_1, ξ_2, ξ_3 — коэффициенты, принимаемые по табл. 19—21.

Таблица 19

Возраст бетона в момент окончания влажного хранения, сут	7 и менее	28	60	90	180	360 и более
ξ_1 (для усадки)	1	0,95	0,93	0,92	0,91	0,9

Таблица 20

Модуль открытой поверхности образца M_0, $м^{-1}$	0	5	10	20	40	60	80 и более
ξ_2 (для ползучести)	0,51	0,65	0,75	0,9	1,1	1,3	1,38
ξ_2 (для усадки)	0,22	0,65	0,83	0,95	1,1	1,15	1,2

Таблица 21

Относительная влажность среды W, %	40 и менее	50	60	70	80	90	100
ξ_3 (для ползучести)	1,3	1,15	1	0,85	0,75	0,6	0,5
ξ_3 (для усадки)	1,35	1,17	1	0,85	0,7	0,5	0

Примечания: 1. Модуль открытой поверхности элемента M_0 находят из отношения $M_0=F/V$ (F — площадь поверхности элемента, открытой для испарения влаги, м²; V — объем элемента, м³). Для стержневых элементов модуль открытой поверхности M_0 вычисляют по формуле $M_0=p/A$ (p — параметр поперечного сечения, соответствующий указанной открытой поверхности, м; A — площадь поперечного сечения элемента, м²). 2. Относительную влажность среды W принимают для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, в зависимости от климатического района строительства как среднюю относительную влажность воздуха наиболее жаркого месяца.

Для районов, относящихся к У1 климатической зоне, относительную влажность воздуха рекомендуется устанавливать как среднемесячную влажность, соответствующую времени загружения (начала высыхания) элементов конструкции.

Для элементов типовых конструкций, климатический район эксплуатации которых не известен, допускается принимать $\xi_3=1$.

6.13. Деформации усадки керамзитобетона на карбонатном песке в момент времени t вычисляются по формуле

$$\varepsilon_s=(t,\ t_w)=\varepsilon_s(\infty,\ t_w)\left[1-e^{-\alpha_s(t-t_w)}\right], \qquad (85)$$

где $\varepsilon_s\ (\infty,\ t_w)$ — предельное значение деформации усадки с момента начала высыхания керамзитобетонного элемента, определяемое по формуле (84); α_s — параметр, характеризующий скорость развития деформаций усадки во времени и принимаемый в зависимости от модуля открытой поверхности элемента по табл. 22.

Таблица 22

Модуль открытой поверхности M_0, $м^{-1}$	10 и менее	20	40	60	80 и более
Значения параметра α_s, $сут^{-1}$	0,004	0,007	0,013	0,021	0,03

Примечание. Для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе в районах, относящихся к IV климатической зоне, указанные в табл. 22 значения параметра α_s относят к началу усадки в осенний и весенний период года (октябрь, апрель); значения параметра α_s увеличивают на 30%, если усадка начинается в летнее время года (июль), и уменьшают на 50% при начале усадки в зимнее время года (январь); для промежуточных сроков применяют линейную интерполяцию.

6.14. Меру ползучести керамзитобетона $C^*\ (t,\ t_0)$ на карбонатном песке к моменту времени t при загружении его в возрасте t_0 принимают в виде

$$C^*(t,\ t_0)=1/E_b(t)-1/E_b(t_0)+C(\infty,\ 28)\Omega(t_0)f(t-t_0), \qquad (86)$$

где $C(\infty,\ 28)$ — предельное значение меры ползучести, определяемое по формуле (83); $\Omega(t_0)$ — функция, учитывающая влияние старения керамзитобетона на меру ползучести; $f(t-t_0)$ — функция, учитывающая нарастание во времени меры ползучести.

6.15. Для функций $\Omega(t_0)$ и $f(t-t_0)$ приняты следующие выражения:

$$\Omega(t_0)=c+de^{-\gamma t_0}\ ; \qquad (87)$$

$$f(t-t_0)=1-ke^{-\gamma_1(t-t_0)}\ , \qquad (88)$$

где $c=0{,}5$; $k=0{,}85$; значения γ и γ_1 принимают по табл. 23, а значение d — по табл. 24.

6.16. Приведенный возраст t_0 при загружении бетона в возрасте до 28 сут, в том числе после тепловой обработки, определяют по формуле

Таблица 23

Параметры	Значения параметров γ и γ_1 при модуле открытой поверхности M_0, $м^{-1}$			
	10 и менее	20	40	60 и более
γ, $сут^{-1}$	0,007	0,011	0,015	0,019
γ_1, $сут^{-1}$	0,006	0,008	0,01	0,012

Таблица 24

t_0, сут	Значения параметра d при модуле открытой поверхности M_0, $м^{-1}$			
	10 и менее	20	40	60 и более
7	0,788	0,809	0,833	0,857
28 и более	0,608	0,68	0,761	0,851

Примечание. Для промежуточных значений M_0 допускается принимать величины γ, γ_1 и d, соответствующие ближайшему табличному значению M_0. Для промежуточных значений t_0 величину d определяют по линейной интерполяции.

$$t_0 = 14(2 - \xi_t)/(1 + e_t), \tag{89}$$

где $\xi_t = [1 - 0{,}779 R_b^N(t_0)/B](2 + 0{,}045B)$. (90)

6.17. Характеристикой ползучести $\varphi(t, t_0)$ называется величина, определяемая по формуле:

$$\varphi(t, t_0) = E_b C^*(t, t_0). \tag{91}$$

Предельные значения характеристики ползучести определяют по формуле

$$\varphi(t_0) = E_b C^*(\infty, t_0) \tag{92}$$

или

$$\varphi(t_0) = \varphi\Omega(t_0), \tag{93}$$

где

$$\varphi = E_b C^*(\infty, 28). \tag{94}$$

В этих формулах $E_b = E_b(28)$ определяют согласно указаниям п. 6.8; $C^*(t, t_0)$ — по формуле (86); $C^*(\infty, t_0)$ — по формуле (86) при $f(t - t_0) = 1$; $C^*(\infty, 28)$ по формуле (86) при $f(t - t_0) = \Omega(t_0) = 1$.

6.18. При пользовании формулами (91) — (93) допускается в формуле (86) принимать величину $1/E_b(t) - 1/E_b(t_0)$, равную нулю.

7. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АРМАТУРЕ, ВЫЗВАННЫХ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ

7.1. При проектировании предварительно напряженных железобетонных конструкций для расчетов необходимо знать напряжения в арматуре и бетоне для стадий изготовления, транспортирования, монтажа и эксплуатации конструкции.

Напряжения в бетоне и арматуре вычисляются по формулам сопротивления упругих материалов от действия усилий предварительного обжатия и внешней нагрузки.

7.2. При использовании формул сопротивления материалов для расчета железобетонных конструкций вводится понятие о приведенном сечении, включающем в себя сечение бетона, а также сечение всей продольной арматуры, умноженное на коэффициент $\alpha = E_s / E_b$, и определяются геометрические характеристики приведенного сечения.

Площадь приведенного сечения $A(red)$ определяется по формуле

$$A_{red} = A_b + \alpha (A_{sp} + A'_{sp}) + \alpha (A_s + A'_s). \qquad (95)$$

Для определения центра тяжести приведенного сечения статический момент относительно растянутой грани сечения S_{red} вычисляется следующим образом:

$$S_{red} = S_b + \alpha A_{sp} a_{sp} + \alpha A'_{sp} (h - a'_{sp}) + \alpha A_s a_s + \alpha A'_s (h - a'_s), \qquad (96)$$

где S_b — статический момент бетонного сечения.

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани

$$y = S_{red} / A_{red}. \qquad (97)$$

Момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести:

$$I_{red} = I_b + \alpha (A_{sp} y^2_{sp} + A'_{sp} y'^{(2)}_{sp}) + \alpha (A_s y^2_s + A'_s y'^{(2)}_s), \qquad (98)$$

где I_b — момент инерции бетонного сечения относительно центра тяжести приведенного сечения.

$$I_b = \Sigma [I_i + A_i (y - y_i)^2]. \qquad (99)$$

При вычислении I_b сечение расчленяется на простые фигуры — прямоугольники и треугольники. Момент инерции площади арматуры из-за малой величины можно не учитывать.

7.3. При действии усилий предварительного обжатия и внешней нагрузки напряжения в бетоне σ_b и σ'_b на уровне центров тяжести арматуры соответственно A_{sp} и A'_{sp} определяют по формулам:

$$\sigma_b = (P_0 + N) / A_{red} + (P_0 e_{op} - M) y_{sp} / I_{red}, \qquad (100)$$

$$\sigma'_b = (P_0 + N) / A_{red} + (M - P_0 e_{op}) y'_{sp} / I_{red}. \qquad (101)$$

В формулах (100) и (101):

$$P_0=\sigma_{sp}A_{sp}+\sigma'_{sp}A'_{sp}, \qquad (102)$$

где P_0 — усилие предварительного обжатия; σ_{sp} и σ'_{sp} — предварительные напряжения в арматуре A_{sp} и A'_{sp} до обжатия бетона (при натяжении арматуры на упоры) либо в момент снижения величины предварительного напряжения до нуля воздействием внешних сил (при натяжении на бетон), вычисленные с учетом первых потерь;

$$e_{op}=(\sigma_{sp}A_{sp}y_{sp}-\sigma'_{sp}A'_{sp}y'_{sp})/P_0; \qquad (103)$$

e_{op} — эксцентриситет приложения усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения; N и M — соответственно продольное усилие и изгибающий момент.

7.4. Для элементов произвольной формы с одиночным армированием напряжения σ_b от усилия предварительного обжатия и от внешней нагрузки определяют по формуле

$$\sigma_b=\overline{\sigma}_b/(1+\mu_p\rho_1\alpha), \qquad (104)$$

где $\overline{\sigma}_b$ — напряжение в бетоне на уровне центра тяжести арматуры A_{sp}, вызванное соответствующим воздействием и подсчитанное как для бетонного элемента без арматуры; $\mu_p=A_{sp}/A_b$ — коэффициент армирования;

$$\rho_1=1+y_{sp}A_b/I_b— \qquad (105)$$

характеристика бетонной части сечения элемента относительно центра тяжести.

7.5. Величину потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести керамзитобетона на карбонатном песке для элементов с одиночной и двойной симметричной арматурой определяют по формуле

$$\sigma_{ec}=u_c\sigma_b/\mu_p\rho_1, \qquad (106)$$

где σ_b, μ_p, ρ_1 — находят согласно указаниям п. 7.4, а функцию u_c по следующим формулам:

а) при определении потерь от быстронатекающей ползучести

$$u_c=1—H^*_b(t_0, t_0); \qquad (107)$$

б) при определении потерь от ползучести за конечный промежуток времени $t—t_0$:

при натяжении арматуры на упоры

$$u_c=1—H^*_b(t, t_0); \qquad (108)$$

при натяжении арматуры на бетон

$$u_c=1—H^*_b(t, t_0)[1+0{,}15\varphi_s(t_0)]; \qquad (109)$$

в) при определении предельной (при $t\to\infty$) величины потерь от ползучести:

при натяжении арматуры на упоры

$$u_c=1—H^*_b(\infty, t_0); \qquad (110)$$

при натяжении арматуры на бетон

$$u_c = 1 - H^*_b(\infty,\ t_0)\,[1 + 0{,}15\varphi_s(t_0)], \qquad (111)$$

где H^*_b — коэффициент затухания напряжений, вычисляемый по формулам:

$$H^*_b(t_0,\ t_0) = \bar{\nu}(t_0); \qquad (112)$$

$$H^*_b(t,\ t_0) = H^*_b(\infty,\ t_0) + [\bar{\nu}(t_0) - H^*_b(\infty,\ t_0)]\,e^{-r(t-t_0)}; \qquad (113)$$

$$H^*_b(\infty,\ t_0) = \bar{\nu}(t_0)\,[1 - 0{,}85\varphi(t_0)\bar{\nu}(t_0)F(t_0)/(1 + 0{,}5\varphi)\bar{\nu}(\infty)], \qquad (114)$$

$$\bar{\nu}(t_0) = 1/[1 + 0{,}15\varphi(t_0)]; \qquad (115)$$

$$\bar{\nu}(\infty) = 1/(1 + 0{,}15\varphi); \qquad (116)$$

$$r = \gamma_1[1 + 0{,}5\bar{\nu}(t_0)\varphi(t_0)]; \qquad (117)$$

$$F(t_0) = 1 + L_1\xi(t_0) + L_1L_2[\xi(t_0)]^2 + \ldots, \qquad (118)$$

$$L_i = [0{,}225i - 0{,}85\cdot\nu(\infty)]/[1 + 1{,}5i + 0{,}425\varphi\cdot\bar{\nu}(\infty)];\ i = 1, 2, 3, \ldots, \qquad (119)$$

$$\xi(t_0) = \bar{\nu}(t_0)\,d\,\varphi\,e^{-\gamma\cdot t_0}, \qquad (120)$$

с заменой φ и $\varphi(t_0)$ соответственно на

$$\varphi_s = \bar{\lambda}\cdot\varphi, \qquad (121)$$

$$\varphi_s(t_0) = \bar{\lambda}\cdot\varphi(t_0). \qquad (122)$$

Значение $\bar{\lambda}$ определяется по формуле

$$\bar{\lambda} = \mu_p\rho_1\alpha/(1 + \mu_p\rho_1\alpha). \qquad (123)$$

Значение $H^*_b(\infty,\ t_0)$ можно принимать по прил. 11.

Значения u_c, вычисляемые по формулам (108) и (109), можно также определять при помощи прил. 11. Для этого предварительно необходимо вычислить условное значение φ_s $(t,\ 28)$ по формуле

$$\varphi_s\ (t,\ 28) = \bar{\lambda}\,E_b(28)C^*(t,\ 28), \qquad (124)$$

где $C^*(t,\ 28)$ находим по формуле (86), полагая $E_b\ (t) = E_b\ (t_0) = E_b\ (28)$. Затем по прил. 11, принимая $\varphi_s\ (t,\ 28)$ вместо φ_s, определяют условное значение $H^*_b\ (\infty,\ t_0)$ и вычисляют u_c по следующим формулам:

при натяжении арматуры на упоры

$$u_c = [1 - 0{,}15\cdot\varphi_s(t,\ 28)]\,[1 - H^*_b(\infty,\ t_0)], \qquad (125)$$

при натяжении арматуры на бетон

$$u_c = 1 - \{1 - [1 - 0{,}15\varphi_s(t,\ 28)]\,[1 - H^*_b(\infty,\ t_0)]\}\,[1 + 0{,}15\varphi_s(t_0)]. \qquad (126)$$

В качестве t_0 принимается приведенный возраст, определяемый согласно п. 6.16, если фактический возраст менее 28 сут, в противном случае в качестве t_0 принимается фактический возраст.

7.6. При наличии в сечении ненапрягаемой арматуры ее влияние на величину потерь предварительного напряжения допускается учитывать путем использования вместо характеристики ползучести

φ_s приведенной характеристики ползучести φ_{bs}, вычисляемой по формуле

$$\varphi_{bs}=u_c/\mu\rho_2\alpha, \tag{127}$$

где величины $\mu=A_s/A_b$, $\alpha=E_s/E_b$, $\rho_2=1+y'A_b/I_b$ и u_c вычисляют как для элемента, имеющего только ненапрягаемую арматуру.

7.7. Предельные величины потерь предварительного напряжения в арматуре σ_{ce} и σ'_{ec} от ползучести керамзитобетона на карбонатном песке для элементов с двойной несимметричной напрягаемой арматурой определяют по формулам:

$$\sigma_{ec}=\nu[\sigma_b(u_c-u'_c)+\rho_1\omega(\sigma_b-\beta'\sigma'_b)(u'_c/\bar{\rho}_2-u_c\bar{\rho}_1)]; \tag{128}$$

$$\sigma'_{ec}=\nu[\sigma_b(u_c-u'_c)+\rho_1(\sigma_b+\beta\sigma_b)(u'_c\bar{\rho}_2-u_c/\bar{\rho}_1)], \tag{129}$$

где

$$\bar{\rho}_{1,2}=\rho_1/2[(1+\omega)\pm\sqrt{(1-\omega^2)+4\omega\beta\beta'}]; \tag{130}$$

$$\nu=1/\mu_p(\bar{\rho}_1-\bar{\rho}_2); \tag{131}$$

$$\omega=\rho_2\mu'_p/\rho_1\mu_p; \tag{132}$$

$$\beta=\rho_{12}/\rho_1;\ \beta'=\rho_{12}/\rho_2; \tag{133}$$

$$\rho_{12}=1-y_{sp}y'_{sp}A_b/I_b. \tag{134}$$

Функции u_c, u'_c, входящие в формулы (128) и (129), определяют согласно указаниям п. 7.5. При этом для нахождения u'_c необходимо заменить $\bar{\lambda}$, φ_s, $\varphi_s(t_0)$, $H^*{}_b(\infty, t_0)$ соответственно на $\bar{\lambda}'$, φ'_s, $\varphi'_s(t_0)$, $H'^*(\infty, t_0)$.

Значения $\bar{\lambda}$ и $\bar{\lambda}'$, необходимые для определения u_c и u'_c, вычисляют по формулам:

$$\bar{\lambda}=\mu_p\bar{\rho}_1\alpha/(1+\mu_p\bar{\rho}_1\alpha),\ \bar{\lambda}'=\mu'_p\bar{\rho}_2\alpha/(1+\mu'_p\bar{\rho}_2\alpha). \tag{135}$$

7.8. В тех случаях, когда обжатие напрягаемой арматурой и передача части постоянной нагрузки на конструкцию происходит в возрасте бетона t_0, а остальная часть и длительная нагрузка прикладываются в возрасте $t_1>t_0$, потери $\sigma_{ec}(t_0)$, $\sigma'_{ec}(t_0)$ и $\sigma_{ec}(t_1)$, $\sigma'_{ec}(t_1)$ подсчитывают отдельно, а затем суммируют алгебраически.

8. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АРМАТУРЕ, ВЫЗВАННЫХ УСАДКОЙ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ

Величину потерь от усадки вычисляют по формулам:

$$\sigma_{es}=E_s\varepsilon_s(\infty, t_w)u_s/(1+\mu_p\rho_1\alpha); \tag{136}$$

$$\sigma'_{es}=E_s\varepsilon_s(\infty, t_w)u'_s/(1+\mu'_p\rho_2\alpha). \tag{137}$$

Величину $\varepsilon_s(\infty, t_w)$ определяют согласно п. 6.12. При этом допускается принимать $t_w=t_0$ $\mu'_p=A'_{sp}/A_b$. $\rho_2=1+A_by'_{sp}/I_b$.

При определении предельной величины потерь от усадки функцию u_s и u'_s вычисляют по формулам:

$$u_s = H_s(\infty) e^{-\alpha_s t_0} ; \qquad (138)$$

$$u'_s = H'_s(\infty) e^{-\alpha_s t_0} . \qquad (139)$$

Здесь значения параметра α_s находят по табл. 22;

$$H_s(\infty) = 1/(1+\varphi_s(\infty)]; \qquad (140)$$

$$H'_s(\infty) = 1/[1+\varphi'_s(\infty)]; \qquad (141)$$

$$\varphi_s(\infty) = 0{,}5\bar{\lambda} E_b C(\infty, 28); \qquad (142)$$

$$\varphi'_s(\infty) = 0{,}5\bar{\lambda}' E_b C(\infty, 28), \qquad (143)$$

где $\bar{\lambda}$ определяют по формуле (121), $\bar{\lambda}'$ — по формуле (121) с заменой μ_p и ρ_1 на μ'_p и ρ_2.

При определении потерь преднапряжения σ_{es} и σ'_{es} за конечный промежуток времени $t-t_0$ функцию u_s и u'_s определяют по формулам:

$$u_s = H_s(\infty) e^{-\alpha_s t_0} [1-e^{-\alpha_s (t-t_0)}]; \qquad (144)$$

$$u'_s = H'_s(\infty) e^{-\alpha_s t_0} [1-e^{-\alpha_s (t-t_0)}]. \qquad (145)$$

Приложение 1

Условные обозначения, принятые в настоящих Рекомендациях

A_b — площадь всего бетона в поперечном сечении;

A_{red} — площадь приведенного сечения элемента;

A_{sp}, A_s — площадь сечения соответственно напрягаемой и ненапрягаемой арматуры;

$B(t)$, $R_{bn}(t)$ — соответственно класс бетона и его нормативная призменная прочность в возрасте t;

R^N, R_b^N — средние значения соответственно кубиковой и призменной прочности;

$E_b(t_0)$ — начальный модуль упругости бетона в момент его загружения;

$E_0(t)$ — то же, в *любом возрасте* t;

$\varepsilon(t,t_0)$ — полная относительная деформация бетона, нагруженного длительной нагрузкой в возрасте t_0 к моменту времени t;

ε_0 — упруго-мгновенная относительная деформация бетона, проявляющаяся в процессе загружения (обжатия) образца;

ε_{pl} — неупругая относительная деформация, проявляющаяся в процессе нагружения (деформация быстронатекающей ползучести);

$\varepsilon_s(t, t_0)$ — относительная деформация ползучести бетона, загруженного в возрасте t_0 к моменту времени t;

$\varepsilon_s(\infty, t_0)$ — предельное значение относительной деформации ползучести;

$\varphi(t_0)$ — предельное значение характеристики ползучести;

φ — предельное значение характеристики ползучести при t_0=28 сут;

$C(t, t_0)$ — удельная относительная деформация ползучести (мера ползучести);

$C(\infty, t_0)$ — предельная мера ползучести;

$C^N(\infty, t_0)$ — предельное значение меры ползучести при базовых условиях;

$\varepsilon_s(t, t_w)$ — относительная деформация усадки бетона к моменту времени t с момента окончания влажного хранения (начала наблюдения) t_w;

$\varepsilon_s(\infty, t_w)$ — предельное значение относительной деформации усадки;

$\varepsilon_S^N(\infty, t_0)$ — предельное значение относительной деформации усадки при базовых условиях;

P_0 — усилие предварительного обжатия;

σ_{sp}, σ'_{sp} — предварительные напряжения соответственно в напрягаемой арматуре S_p и S'_p до обжатия бетона (при натяжении на упоры) либо в момент снижения величины предварительного напряжения в бетоне до нуля воздействием на элемент внешних фактических или условных сил, определяемых согласно СНиП 2.03.01—84 с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы элемента;

e_{op} — эксцентриситет усилия предварительного обжатия P_0 относительно центра тяжести приведенного сечения;

y_{sp}, y'_{sp} — расстояние от центра тяжести приведенного сечения до точек приложения равнодействующих усилий в арматуре S_p и S'_p;

$H^*_b(t—t_0)$ — коэффициент затухания напряжений в бетоне на уровне центров тяжести арматуры S_p (S'_p) за конечный промежуток времени $t—t_0$;

$H^*_b(\infty, t_0)$ — предельное (при $t\to\infty$) значение коэффициента затухания;

$H_s(\infty)$, $H'(\infty)$ — коэффициент изменения напряжений в арматуре S_p и S'_p вследствие усадки бетона;

ρ — плотность бетона в сухом состоянии.

Приложение 2

Рекомендуемые формы журналов изготовления, характеристик и результатов испытаний образцов

Журнал изготовления образцов серии _____ Форма № 1

1. Дата изготовления _____

2. Проектная марка бетона _____

3. Материалы _____

4. Состав бетона _____

5. Способ формования и характеристики средств формования _____

Вид образцов	Проектные размеры, мм		Проектная плотность свежеуложенного бетона, кг/м³	Фактическая плотность свежеуложенного бетона, кг/м³	Условия твердения	Количество, шт.	Примечание
	сечение	высота					

Форма № 2

Журнал образцов серии _____ и их характеристики

Дата изготовления_____

Вид образцов	Возраст бетона к началу испытаний, сут	Вид испытаний	Фактические размеры, мм		Площадь сечения, $см^2$	Объем, $см^3$	Плотность ρ, $кг/м^3$		Примечание
			сечение	высота			образцов	средняя по серии	

Форма № 3

Журнал обработки данных для определения характеристик бетона образцов серии _____

Дата изготовления образцов _____

Приборы _____

База измерений, l _____, мм

№ образца	Возраст бетона к началу испытания, сут	Модуль упругости E_b, МПа	Разрушающая нагрузка N_d, кН	Призменная прочность R_{bn}^N, МПа	Кубиковая прочность R_p^N, МПа	Примечание

Форма № 4

Журнал величин деформаций усадки образцов серии _____

Дата изготовления образцов_____

Дата начала наблюдений_____

Возраст бетона к началу наблюдений _____, сут

Приборы _____

База измерения деформаций l _____, м

Дата и время снятия отсчетов	Длительность наблюдений, сут	Образец № 1						Образцы № 2, ..., n	
		Отсчеты по приборам		Абсолютные деформации Δl, мм, по приборам			Относительные деформации образца $\varepsilon_c \cdot 10^5$	....	Средние по серии из образцов относительные деформации $\varepsilon_s \cdot 10^5$
		№	№	№	№	средние			

Форма № 5

Журнал нагружения образцов серии _____длительной нагрузкой при ступенчатом характере ее приложения и величин относительных деформаций

Дата нагружения образца _____

Возраст бетона в момент загружения_____, сут

База измерения деформаций l= _____, мм

Приборы _____

Нагружающее устройство и его характеристики _____

Полная длительная нагрузка N= _____, кН

№ образца	№ ступени	Нагрузка N, кН	Время, t		Показания приборов				Относительные деформации $\varepsilon \cdot 10^5$			Примечание
			абсолютное, ч — мин	продолжительность, мин	№		№		по приборам		образцы	
					отсчет	приращение	отсчет	приращение	№ . .	№ . .		

Форма № 6

Журнал обработки данных при ступенчатом загружении длительной нагрузкой образцов серии _____

№ образца	Призменная прочность R_{bn}^{N}, МПа	№ ступени	Нагрузка N, кН	Напряжение σ_b, МПа	Уровень обжатия $\eta = \sigma_b / R_{bn}^{N}$	Относительные деформации		Примечание
						упругие $\varepsilon_0 \cdot 10^5$	пластические $\varepsilon_{pl} \cdot 10^5$	

Форма № 7

Журнал измерений по приборам и величин длительных деформаций ползучести образцов серии _____

Дата изготовления образцов_____

Возраст бетона в момент загружения, _____сут

Нагружающее устройство и его характеристики _____

База измерения деформаций l = _____мм

Дата и время снятия отсчетов	Длительность наблюдений, ч — мин	Образец № 1, нагрузка N = кН					Относительные деформации образца $\varepsilon_c \cdot 10^5$	Образцы № 2 ... n	Средние относительные деформации по серии из образцов $\varepsilon_c \cdot 10^5$
		Отсчеты по приборам		Абсолютные деформации Δl, мм				....	
		№ . .	№ . .	по приборам № . . .	по приборам № . . .	образца			

Форма № 8

Журнал вычисления средних относительных деформаций и параметров ползучести бетона образцов серии _____

Возраст бетона в момент нагружения _____, сут

Напряжения в бетоне от длительной нагрузки σ_b = _____, МПа

Упругие деформации, проявившиеся к моменту окончания нагружения $\varepsilon_0 \cdot 10^5$ = _____

Длительность наблюдения, сут	Средние по серии		
	Относительные деформации усадки $\varepsilon_s \cdot 10^5$	Относительные деформации ползучести $\varepsilon_c \cdot 10^5$	Мера ползучести $C^*(t, t_0) 10^4$, 1/МПа

Экспериментальное определение деформаций усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке *

Длительные деформации керамзитобетона на карбонатном песке во многом зависят от состава бетона, а также от свойств крупного и мелкого заполнителя, обладающих значительной изменчивостью, связанной с особенностями их структуры. В связи с этим целью эксперимента являлось:

получение данных о длительных деформациях керамзитобетона на карбонатном песке в зависимости от факторов, характеризующих его состав: расхода цемента и относительного содержания известнякового песка в объеме крупного и мелкого заполнителя $r=М/(М+К)$;

изучение влияния факторов состава на величину модуля упругости керамзитобетона;

оценка воздействия термовлажностной обработки на прочность, а также на рост деформаций ползучести и усадки;

установление характера изменения деформаций усадки, ползучести и модуля упругости во времени.

Исследования проводили с позиций многофакторного регрессионного анализа. За основу эксперимента принимали статистический план Бокса-Бенкена для трех факторов на трех уровнях (план типа 3^3).

В качестве исследуемых факторов принимали: x_1 — расход цемента, кг/м^3; x_2 — агрегатно-структурный фактор $М/(М+К)$ (содержание карбонатного песка в объеме, занимаемом мелким и крупным заполнителем в бетоне); x_3 — относительный начальный уровень обжатия керамзитобетона при испытании на ползучесть $\eta=\sigma_b(t_0)/R_{bn}^N(t_0)$. Уровни факторов в натуральном выражении приведены в табл. 1.

Расход воды был принят постоянным, а варьирование фактором x_1 приводило к изменению водоцементного отношения и, следовательно, прочности бетона. Прочие факторы (сорт и активность цемента, зерновой состав и прочность заполнителей, способы приготовления и уплотнения смеси, а также возраст бетона к моменту начала наблюдений, масштабный фактор, форма эпюры напряжений в бетоне и т. п.), влияние которых в рамках данного эксперимента не исследовалось, удерживали на постоянном уровне. Все исследуемые составы керамзитобетона приведены в табл. 2.

Для оценки влияния пропаривания на величины длительных деформаций керамзитобетона на карбонатном песке план эксперимента был реализован дважды: для бетона естественного твердения и пропаренного по режиму (3+3+7+3 ч).

Для оценки влияния вида песка опыты с составом 2 (см. табл. 2) были продублированы на кварцевом песке.

---

* Опытные данные канд. техн. наук А. И. Романова.

Таблица 1

Уровни	Факторы			
	x_1, кг/м³	x_2, М/(М+К)	x_3 для бетона	
			пропаренного	естественного твердения
+1	310	0,3	0,1	0,25
0	470	0,5	0,25	0,375
—1	630	0,7	0,4	0,5

Таблица 2

№ состава	Расход материалов на 1 м³ бетона, л					
	Ц	В	Песок		Керамзит, мм	
			карбонатный	кварцевый	5—10	10—20
1	153	250	179	(299)	209	209
2	153	250	299	—	149	149
3	205	250	382	—	82	81
4	205	250	164	—	191	190
5	101	250	454	—	98	97
6	101	250	195	—	227	227
7	205	250	273	—	136	136
8	101	250	325	—	162	162
9	153	250	417	—	90	90

В ходе эксперимента контролировались:

кубиковая и призменная прочности керамзитобетона;
модуль упругости $E_b(t)$;
относительные деформации усадки $\varepsilon_s(t, t_w)$;
относительные деформации ползучести $\varepsilon_c(t, t_0)$.

В каждой точке плана было принято минимум двукратное дублирование опытов.

Образцами служили призмы размером 10×10×42 см и кубы с длиной ребра 15 см. Изоляция поверхности призм не производилась. Количество и назначение образцов в эксперименте приведено в табл. 3. Количество образцов, представленное в таблице до чер-

Таблица 3

Состав бетона	Факторы		Контролируемые параметры					
	x_1	x_2	Кубиковая прочность $R^N(t)$, «В»	Призменная прочность $R_b^N(t)$, «Р»	Модуль упругости $E_b(t)$, «М»	Усадка $\varepsilon_s(t, t_w)$, «У»	Ползучесть $\varepsilon_c(t, t_0)$, «П»	Температурный эталон «Т»
1	0	—	3/3	2/2	2/2	4/4	4/4	3/3
2	0	0	3/3	3/3	3/3	6/6	4/4	—
2к	0	0	3/—	3/—	3/—	6/—	4/—	—
3	+	+	3/3	6/3	2/2	3/2	4/2	—
4	+	—	3/3	3/3	2/2	2/2	2/2	—
5	—	+	3/3	3/3	2/2	2/2	2/2	—
6	—	—	3/3	3/3	2/2	2/2	2/2	—
7	+	0	3/3	2/2	2/2	4/4	4/4	—
8	—	0	3/3	2/2	2/2	4/4	4/4	—
9	0	+	3/3	2/2	2/2	4/4	4/4	—

ты, относится к бетону естественного твердения, а после черты — к пропаренному бетону.

При изготовлении образцов использовали следующие материалы:

портландцемент марки 500 Николаевского завода;

карбонатный песок — отходы камнепиления известняка-ракушечника Орловского карьера Одесской области крупностью 0—5 мм и объемной плотностью зерен в цементном тесте $\rho=2{,}42$ т/м^3;

кварцевый песок — морской, плотностью $\rho=2{,}38$ т/м^3;

керамзитовый гравий крупностью 5—10 и 10—20 мм из глин Орловского месторождения Одесской области. Объемное соотношение фракций гравия в составе бетона принимали постоянным, равным единице. Плотность зерен керамзита в цементном тесте составляла соответственно $\rho_{5-10}=0{,}885$ т/м^3 и $\rho_{10-20}=0{,}85$ т/м^3.

Возраст бетона к началу испытаний выбирали исходя из условия достижения им около 70% проектной прочности, что соответствовало $t_0=2$ сут для пропаренных образцов и $t_0=7$ сут для образцов естественного твердения. Контроль температурных деформаций осуществляли при помощи температурных эталонов с полностью изолированной от высыхания поверхностью.

Температура и влажность в помещении для испытания образцов характеризовались следующими средними показателями:

$$t^\circ=20\pm4^\circ\,\mathrm{C};\quad W=75\pm5\%.$$

Испытанием образцов групп «В» и «Р» (см. табл. 3) в возрасте двух суток для пропаренных и семи суток для твердеющих в естественных условиях определяли кубиковую и призменную прочность керамзитобетона. По результатам испытаний вычисляли необходимое усилие обжатия образцов группы «П» и нагружали их в пружинных установках по две призмы в каждой. Неупругие деформации, зафиксированные в процессе загружения, относили к ползучести бетона. После загружения установок снимали первые показания приборов призм группы «У». Призмы группы «М» периодически испытывали на модуль упругости при $\sigma_b=0{,}3R_b^N$. В период между испытаниями эти образцы использовали для дополнительного контроля усадочных деформаций и потерь влаги бетоном.

Прочность и модуль упругости

В результате обработки экспериментальных данных и их статистического анализа были получены следующие регрессионные модели призменной прочности пропаренного бетона $R_b^{N\ \text{проп}}$ (2) и бетона естественного твердения $R_b^{N\ \text{ест}}$ (7):

$$R_b^{N\ \text{проп}}(2)=12{,}73+3{,}98x_1+2{,}23x_1^2; \qquad (1)$$

$$R_b^{N\ \text{ест}}(7)=15{,}28+3{,}48x_1. \qquad (2)$$

Для кубиковой прочности керамзитобетона при сжатии получены выражения:

$$R^{N\ \text{проп}}(28)=21{,}04+4{,}28x_1+0{,}21x_2+0{,}65x_1x_2-0{,}29x_1^2+0{,}41x_2^2; \qquad (3)$$

$$R^{N\ \text{ест}}(28)=17{,}41+4{,}55x_1+2{,}22x_2+0{,}58x_1x_2+2{,}12x_1^2+2{,}02x_2^2. \qquad (4)$$

Приведенные модели адекватно (по Фишеру) представляют зависимость прочности от исследуемых факторов. Средние коэффициенты вариации по всем опытам составили $c_v^{\text{проп}}=7{,}82\%$; $c_v^{\text{ест}}=8{,}14\%$.

Моделирование величины модуля упругости в разных возрастах керамзитобетона на карбонатном песке позволило оценить и проследить изменение во времени влияния на модуль факторов x_1 и x_2. Регрессионные модели для описания величины модуля упругости керамзитобетона некоторых возрастов для пропаренного керамзитобетона приведены в уравнениях (5), а для бетона естественного твердения в уравнениях (6):

$$\left.\begin{aligned}
&E_b^{\text{проп}}\ (2)=(11{,}08+2{,}27x_1+1{,}3x_2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{проп}}\ (28)=(13{,}15+2{,}16x_1+1{,}41x_2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{проп}}\ (94)=(14{,}46+2{,}04x_1+1{,}36x_2+1{,}47x_1^2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{проп}}\ (175)=(12{,}51+2{,}51x_1+2{,}26x_2)\,10^3\ \text{МПа};
\end{aligned}\right\}\qquad(5)$$

$$\left.\begin{aligned}
&E_b^{\text{ест}}\ (7)=(13{,}18+2{,}53x_1+1{,}89x_2+0{,}83x_1^2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{ест}}\ (28)=(14{,}48+2{,}42x_1+2{,}49x_2+0{,}65x_1x_2+\\
&\qquad+0{,}73x_1^2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{ест}}\ (170)=(14{,}06+2{,}25x_1+2{,}82x_2+0{,}69x_1x_2)\,10^3\ \text{МПа};\\
&E_b^{\text{ест}}\ (360)=(14{,}43+2{,}38x_1+3{,}09x_2)\,10^3\ \text{МПа}.
\end{aligned}\right\}\qquad(6)$$

Как видно из приведенных уравнений, модуль упругости растет с увеличением расхода цемента и объемного содержания карбонатного песка.

Область установившихся значений модуля упругости керамзитобетона естественного твердения заключена в пределах $(1{,}02—1{,}97)10^4$ МПа. Модуль упругости пропаренного бетона тех же составов характеризуется меньшими величинами. Средняя величина разности составляет 10%.

В результате обработки массива коэффициентов при членах регрессии уравнений (6) получена зависимость, характеризующая изменение модуля упругости бетона естественного твердения во времени:

$$E_b(t)=E_b(28)+0{,}001t^2—(24—2t)r,\ \text{МПа}.\qquad(7)$$

Приведенная зависимость учитывает параметр состава смеси «r». Адекватность представления опытных данных оценивается коэффициентом вариации $c_v=4{,}5\%$.

Усадка керамзитобетона на карбонатном песке.

Усадку измеряли на образцах групп «У» и «М» (см. табл. 3), изготовленных в соответствии с двухфакторным планом Бокса-Бенкена.

Задача эксперимента заключалась в построении регрессионной модели, способной дать описание относительных деформаций усадки в зависимости от состава бетона, а также в том, чтобы проследить их развитие с возрастом бетона t.

Анализ полученных в результате статистической обработки

уравнений регрессии (8, 9), произведенный по значимым коэффициентам для разных возрастов бетона, позволил сделать ряд выводов.

Влияние исследуемых факторов на усадку в начальный период созревания керамзитобетона характеризуется большой изменчивостью. В зрелом возрасте ($t \geqslant 180$ сут) усадка бетона естественного твердения возрастает с увеличением расхода цемента и относительного объемного содержания карбонатного песка.

С увеличением расхода цемента деформации усадки растут не пропорционально, а с отрицательным ускорением. Это объясняется проявлением двух противоположных тенденций. С одной стороны, увеличение расхода цемента повышает «жирность» смеси и способствует росту усадки, с другой — возрастающая за счет уменьшения величины W/Cm прочность бетона оказывает сдерживающее влияние на усадку. В нашем случае первая тенденция преобладает, поскольку увеличение расхода цемента в опыте происходит при постоянном содержании воды в смеси.

Изложенное позволяет сделать вывод о возможности регулирования деформаций усадки путем варьирования компонентами состава керамзитобетона на карбонатном песке.

Величины относительных деформаций усадки керамзитобетона в возрасте $t=360$ сут для бетона естественного твердения и $t=175$ сут для пропаренного бетона в зависимости от его состава с записью переменных в натуральных единицах приведены ниже

$$\varepsilon_s^{\text{ест}}(360) = (0{,}303Ц - 0{,}0003Ц^2 + 163{,}75r - 147{,}7r^2 - 41{,}3)\,10^{-5}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_s^{\text{проп}}(175) = (0{,}0563Ц - 0{,}00002Ц^2 + 4{,}195r + 4{,}23r^2 + 27)\,10^{-5}. \quad (9)$$

На рис. 1–5 приведены графики изменения величин усадки бетона естественного твердения во времени по всем исследованным составам, а на рис. 6 графики деформации усадки пропаренного керамзитобетона составов *7*, *2* и *8*.

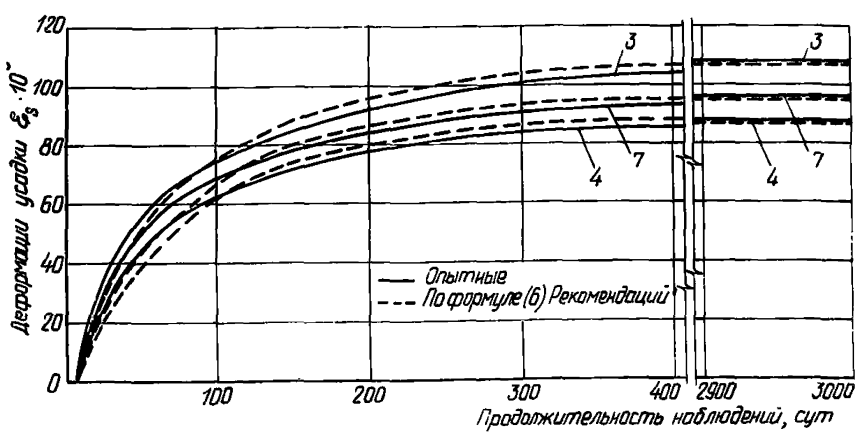


Рис. 1. Деформации усадки керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 630 кг/м³ составов *3* ($r=0{,}7$), *7* ($r=0{,}5$), *4* ($r=0{,}3$)

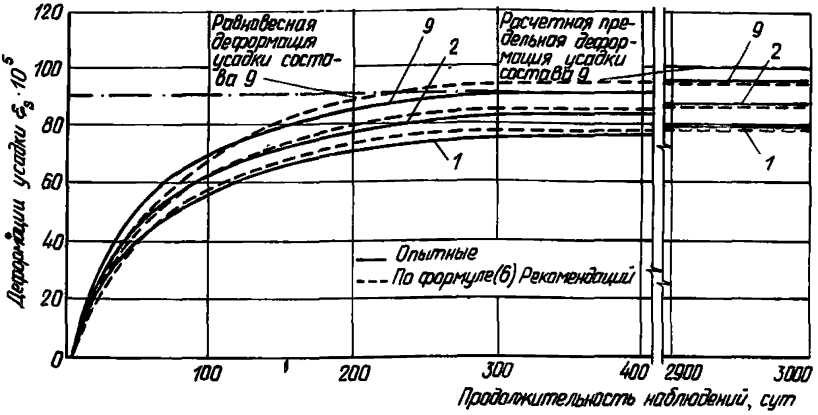


Рис. 2. Деформации усадки керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 470 кг/м³ составов 9 (r=07,), 2 (r=0,5), 1 (r= =0,3)

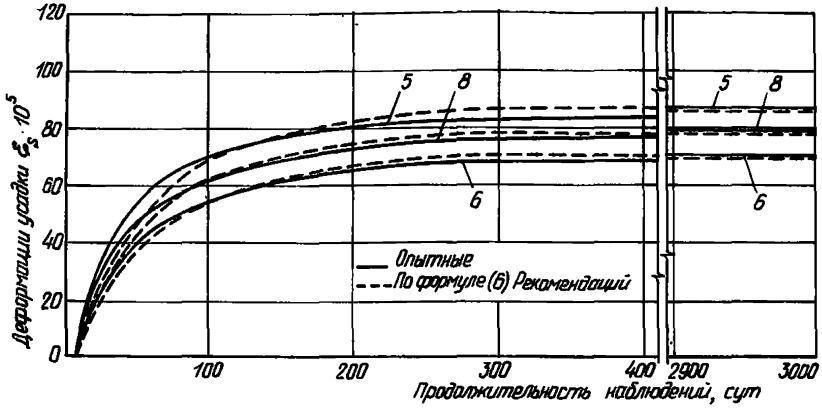


Рис. 3. Деформации усадки керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 310 кг/м³ составов 5 (r=0,7), 8 (r=0,5), 6 (r= =0,3)

Анализируя изменение усадочных деформаций во времени, можно заметить, что характерной особенностью графиков усадки бетона естественного твердения является участок интенсивного роста деформаций при $7 \leqslant t \leqslant 60$ сут, совпадающий с периодом созревания бетона. Рост усадки пропаренного керамзитобетона происходит более плавно.

В возрасте t=60 сут усадка керамзитобетона естественного твердения в среднем на 53—101% превышает соответствующие величины пропаренного бетона. Усадочные деформации бетона есте-

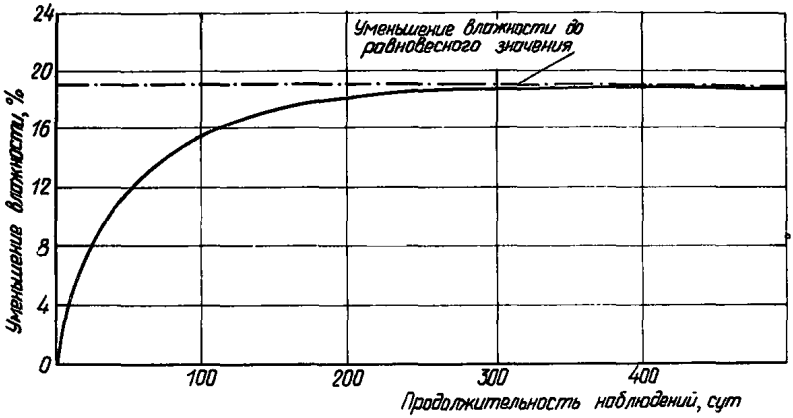


Рис. 4. Зависимость потерь влажности керамзитобетона на карбонатном песке состава 9 от времени высыхания

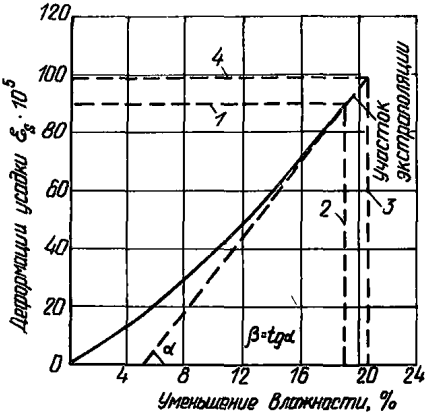
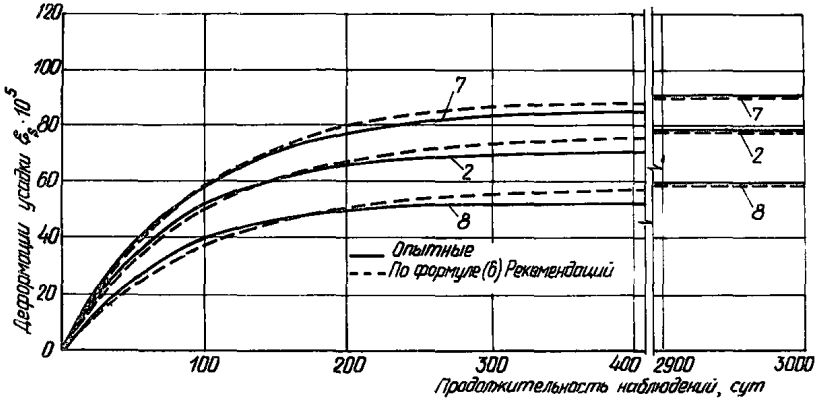


Рис. 5. Зависимость деформаций усадки от потерь влажности керамзитобетона состава 9 *1* — равновесная деформация усадки; *2* — равновесное значение потери влажности бетона; *3* — начальная влажность бетона; 4 — расчетная предельная деформация усадки

Рис. 6. Деформации усадки пропаренного керамзитобетона на карбонатном песке при r = 0,5 составов 7, 2 и 8



ственного твердения зрелого возраста ($t>60$ сут) продолжают расти с постепенно затухающей интенсивностью и к 175—180 сут их величины составляют 1,045—1,315 усадки соответствующих составов пропаренного бетона.

Предельные величины деформаций усадки $\varepsilon_s(\infty, t_w)$, рассчитанные по методике, изложенной в п. 3.79, составили:

для керамзитобетона естественного твердения $(70—110)10^{-5}$;
для пропаренного $(60—95)10^{-5}$.

Аппроксимацию экспериментальных данных по усадке керамзитобетона на карбонатном песке в зависимости от времени наблюдений осуществляли по формуле (6) основного текста.

Расчетные значения параметра α_s, подобранные методом наименьших квадратов для каждой из экспериментальных кривых, лежат в диапазоне:

для бетона естественного твердения $\alpha_s = 0{,}0119—0{,}0148$;
для пропаренного $\alpha_s = 0{,}0095—0{,}0115$.

Среднеквадратические отклонения, характеризующие ошибку аппроксимации, составляют соответственно $\sigma_y^{ест} = 3{,}6—5{,}1$ и $\sigma_y^{проп} = 2{,}2—3{,}4$, а средние коэффициенты вариации $c_v^{ест} = 9{,}5—13{,}5\%$; $c_v^{проп} = 7{,}2—12{,}1\%$.

Ползучесть керамзитобетона на карбонатном песке

Фактические уровни напряжений сжатия образцов при испытании приведены в табл. 4.

У всех загруженных образцов было установлено наличие линейности деформаций ползучести. Относительное напряжение сжатия при этом составляло $0{,}085 \leqslant \eta \leqslant 0{,}447$.

Наличие линейности позволило, исключив фактор x_3, проверить гипотезу о принадлежности выборочных значений $C(t, t_0)$ к одной генеральной совокупности и использовать для анализа средние результаты по всем образцам одного состава при разных относительных напряжениях η. Проверка, выполненная по критерию Кохрена, показала, что гипотеза подтвердилась с 95%-ной надежностью.

Это позволило произвести расчет планов эксперимента с позиций двухфакторного регрессионного анализа и получить зависимости удельных деформаций $C(t, t_0)$ от факторов состава бетона x_1 и x_2 для разных возрастов t.

Ниже приведены выражения, полученные для бетона естественного твердения в возрасте $t=360$ сут, пропаренного в возрасте $t=175$ сут, записанные после раскодирования переменных в натуральных единицах:

$$C(360,7) = [Ц(1{,}061Ц—1133{,}3)10^{-5} + r(0{,}2955r + 2{,}5021) — \\ —0{,}00422Цr + 4{,}751]10^{-4} \quad (10)$$

$$C(175,2) = [Ц710—0{,}16Ц—212{,}3r)10^{-5} + \\ + r(1{,}188 + 0{,}0574r) + 1{,}223]10^{-4}\ . \quad (11)$$

Таблица 4

Марка образца	Естественное твердение			Пропаривание		
	$R^N_{bn}(7)$, МПа	$\sigma_b(7)$, МПа	$\eta=\sigma_b(7)/R^N_{bn}(7)$	$R^N_{bn}(2)$, МПа	$\sigma_b(2)$, МПа	$\eta=\sigma_b(2)/R^N_{bn}(2)$
1-1П	16,4	4,1	0,247	11,8	1	0,085
7-2П	10	2,5	0,25	20	1,9	0,095
8-3П	11,9	2,8	0,236	11,3	1,9	0,172
9-4П	11,2	2,6	0,232	12	1,2	0,1
2-5,6П	16,1	6	0,373	12,8	3	0,232
2-7,8П	16,1	5,7	0,354	12,8	3,1	0,238
3-9П	20,1	5,7	0,285	20,1	4,8	0,241
4-10П	17,7	6,6	0,37	18,1	4,4	0,24
5-11П	11,8	3,8	0,325	12,2	2,9	0,286
6-12П	10,2	4,5	0,446	10,4	2,6	0,249
1-13П	15,5	4,4	0,284	13,6	6,1	0,447
7-14П	16,3	7,2	0,442	17,9	7,1	0,394
8-15П	10,4	4,3	0,413	10,2	3,7	0,362
9-16П	10,9	4,3	0,395	12,9	4,4	0,342

Приведенные уравнения показывают, что удельные деформации ползучести керамзитобетона на карбонатном песке уменьшаются с увеличением расхода цемента, а следовательно, с ростом прочности бетона. Ниже представлено выражение, полученное совместным решением уравнений (2) и (10) и позволяющее прогнозировать ползучесть в зависимости от призменной прочности и относительного содержания известнякового песка.

$$C(360,7)=\{R^N_b(7)\,[22{,}35R_{bn}(7)-1937r-7444]10^{-5}+$$

$$+r(0{,}2955r+3{,}474)+7{,}926\}10^{-4}\ ,\ 1/\text{МПа}. \qquad (12)$$

Увеличение относительного объемного содержания карбонатного песка, а следовательно, увеличение объема растворной части бетона приводят к росту ползучести. Это можно объяснить уменьшением сдерживающего влияния, которое гранулы керамзита оказывают на ползучесть растворной части бетона.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что ползучесть керамзитобетона на карбонатном песке подчиняется основным за-

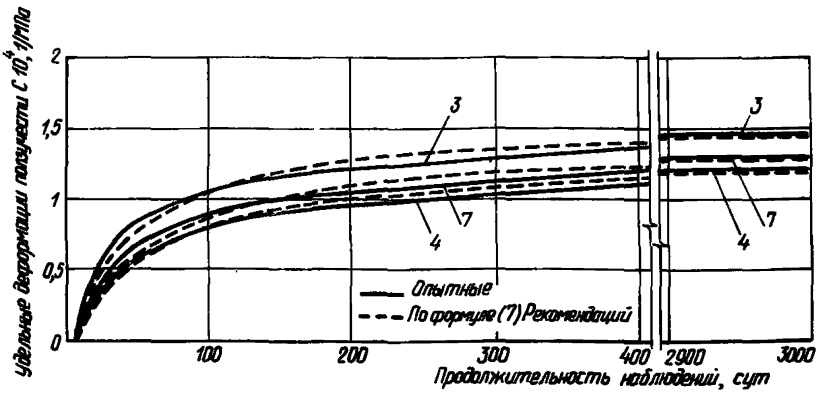


Рис. 7. Удельные деформации ползучести керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 630 кг/м³ составов *3*(r=0,7), *7*(r=0,5), *4*(r=0,3)

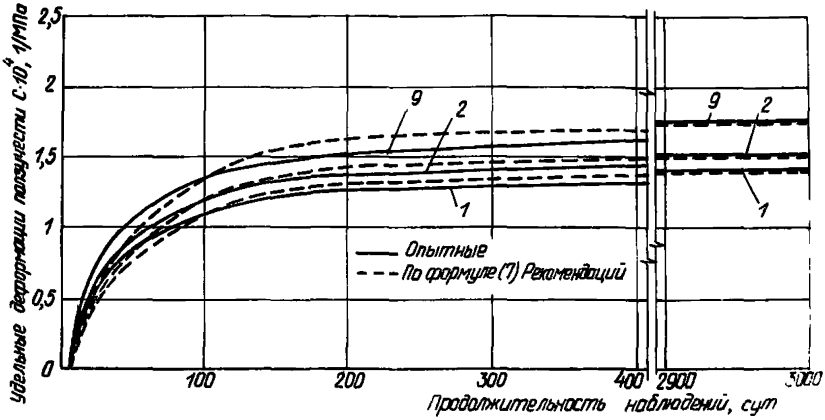


Рис. 8. Удельные деформации ползучести керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 470 кг/м³ составов *9*(r=0,7), *2*(r=0,5), *1*(r=0,3)

кономерностям, присущим ползучести тяжелых бетонов и легких бетонов на пористых заполнителях.

Величину деформаций ползучести можно в широких пределах регулировать путем рационального подбора компонентов состава на основании выражений (10)—(12).

Значительное влияние на ползучесть оказывает пропаривание керамзитобетона. Установлены различия как в характере развития, так и в конечных величинах ползучести керамзитобетонов естественного твердения и пропаренного. Ползучесть керамзитобетона

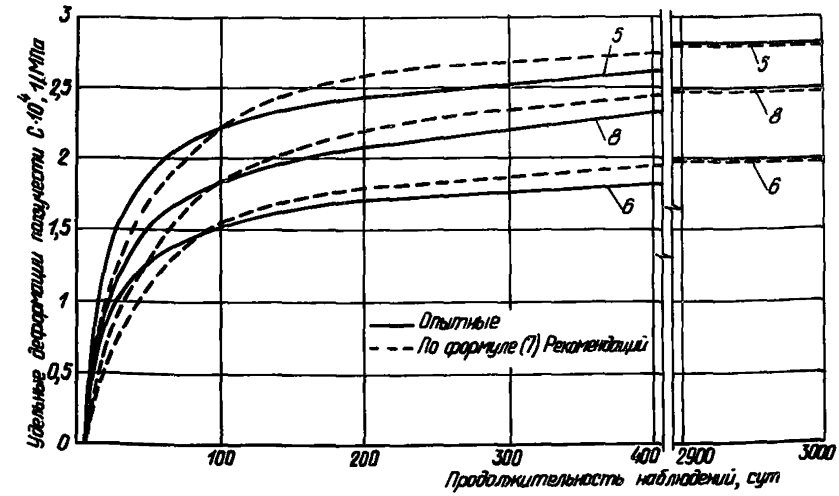


Рис. 9. Удельные деформации ползучести керамзитобетона на карбонатном песке при расходе цемента 310 кг/м³ составов *5* ($r=0{,}7$), *8* ($r=0{,}5$), *6* ($r=0{,}3$)

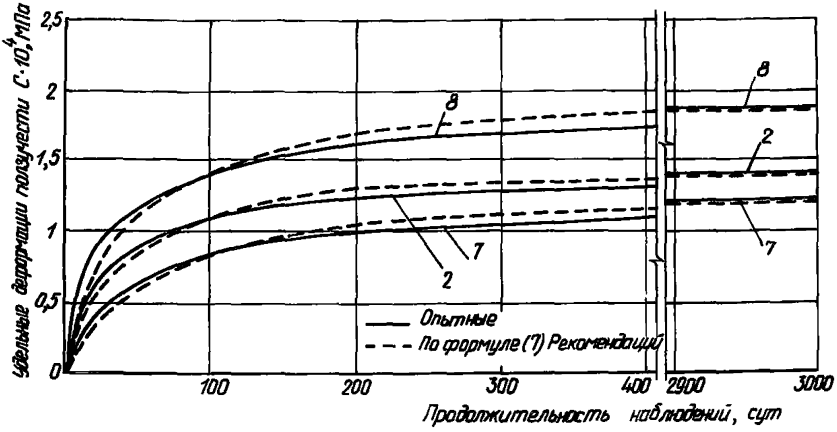


Рис. 10. Удельные деформации ползучести пропаренного керамзитобетона на карбонатном песке при $r=0{,}5$ составов *7*, *2* и *8*

естественного твердения интенсивно нарастает в начальный период $t\leqslant 40$—60 сут. Затем интенсивность роста ползучести постепенно уменьшается. Нарастание ползучести пропаренного керамзитобетона происходит более плавно и с меньшей скоростью. Наибольшее снижение ползучести за счет пропаривания происходит у составов с минимальными расходами цемента при максимальном содержании

песка в смеси заполнителей. Иными словами, пропаривание как способ снижения ползучести более всего пригодно для смесей с большим объемом растворной части бетона при минимальных расходах цемента.

На рис. 7—10 приведены графики развития во времени относительных удельных деформаций ползучести по всем испытанным составам.

Предельные величины удельных деформаций ползучести, рассчитанные по методике, изложенной в п. 3.79, составили:

для бетона естественного твердения $(1{,}2—2{,}8)10^{-4}$, 1/МПа;

для пропаренного бетона $(0{,}98—2{,}1)10^{-4}$, 1/МПа.

Для аппроксимации экспериментальных кривых было использовано выражение (7) основного текста. Ошибка аппроксимации, характеризуемая средними коэффициентами вариации, составила $c_v = 11{,}5—18{,}1\%$.

Приложение 4

Экспериментальное определение потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке *

Центрально обжатые элементы (стержни)

В задачу настоящего эксперимента входило:

установление закономерности изменения во времени деформаций ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном и, для сопоставления, кварцевом песках;

оценка конечных величин потерь напряжения от ползучести и усадки и их связь с прочностью бетона и его составом;

получение зависимости потерь предварительного напряжения в арматуре от уровня относительных напряжений сжатия бетона;

сопоставление опытных величин потерь с расчетными.

В соответствии с поставленной задачей эксперимент строился по двухфакторной схеме. Матрица плана эксперимента приведена в табл. 1.

Фактор «*A*» — относительное напряжение сжатия бетона в момент спуска натяжения арматуры — имел четыре уровня (от 0 до $0{,}6R_b^N$ с интервалом, равным $0{,}2R_b^N$). Фактор «*B*» — прочность керамзитобетона на осевое сжатие — имел три уровня (15, 22,5 и 30 МПа).

В качестве основных образцов в исследовании применяли обычные («С») и предварительно напряженные («СН») керамзитобетонные призматические стержни размером 10×10×90 см, центрально армированные 2 Ø 10 А-IIIв и 2 Ø 14 А-IIIв. Для каждого сочетания факторов «А» и «В» (гр. 2—4 табл. 1) изготовляли по три образца-близнеца. Для определения сопутствующих параметров керамзитобетона изготовляли дополнительные образцы-кубы размером 10×10×10 см в количестве 18 шт. и призмы размером 10×10×42 см в количестве 20 шт. для каждого состава.

---

* Опытные данные канд. техн. наук А. И. Романова.

В принятом плане (табл. 1) при обеспечении уровней фактора «В» (прочность керамзитобетона) использованы те же составы, что и в исследовании усадки и ползучести керамзитобетона (прил. 3).

Таблица 1

«А»	Уровни фактора «В»		
	B_1 $R_{28}=15$МПа	B_2 $R_{28}=22{,}5$МПа	B_3 $R_{28}=30$МПа
1	2	3	4
A_1 ($\eta=0$)	15С-1	22С-1	30С-1 30СК-1 30С14-1 30СК14-1
A_2 ($\eta=0{,}2$)	15СН-2	22СН-2	30СН-2 30СНК-2
A_3 ($\eta=0{,}4$)	15СН-3	22СН-3	30СН-3 30СНК-3
A_4 ($\eta=0{,}6$)	15СН-4	22СН-4	30СН14-4 30СНК14-4

Так, центральная точка плана — бетон прочностью 22,5 МПа имеет состав под номером 2, приведенный в табл. 2 прил. 3, бетон прочностью 30 МПа — состав номер 7; бетон прочностью 15 МПа — состав номер 6. Это позволило результаты данного эксперимента прямо сопоставлять с результатами предыдущих экспериментов. Образцы изготовляли на быстротвердеющем портландцементе.

Натяжение арматуры производили на упоры лабораторного механического стенда гидравлическим домкратом грузоподъемностью 500 кН. Усилие контролировалось по манометру насосной станции и показаниями динамометра грузоподъемностью 200 кН, установленного между домкратом и арматурными стержнями.

Передачу усилий натяжения арматуры осуществляли в возрасте керамзитобетона $t_0=2$ сут. С этого момента начинали отсчет длительных деформаций.

Система маркировки образцов представлена в табл. 1. В качестве основного диаметра напрягаемой и ненапрягаемой арматуры керамзитобетонных стержней был принят диаметр 10А-IIIв. Арматуру диаметром 14А-IIIв использовали в керамзитобетонных стержнях из бетона прочностью 30 МПа при уровне напряжений обжатия $\eta=0{,}6$ в связи с тем, что напряжения в арматуре диаметром 10 мм при данном η значительно превышают $R_{sn}=550$ МПа стали класса А-IIIв.

Температурно-влажностные условия в помещении для испытания образцов характеризовались следующими средними показателями: $t=20\pm4°$ С и $W=75\pm10\%$.

Изготовленные одновременно с керамзитобетонными стержнями и испытанные в момент передачи на бетон усилий натяжения арма-

туры, призмы использовались для контроля прочности бетона в каждой серии образцов и уточнения фактической величины относительных напряжений обжатия η. Результаты испытания кубов и призм в момент отпуска натяжения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Проектная прочность, МПа	$R^N_{bm}(2)$, МПа	$E_b(2)$, МПа	E_s, МПа
15	8	$8{,}1\cdot10^3$	$19{,}2\cdot10^4$
22,5	15,1	$10{,}5\cdot10^3$	$19\cdot10^4$
30	22,3	$14{,}8\cdot10^3$	$19{,}2\cdot10^4$
30 (кварцевый песок)	22,6	$14{,}8\cdot10^3$	$19{,}5\cdot10^4$

Деформированное состояние и потери от быстронатекающей ползучести

Отпуск натяжения арматуры производился в двухдневном возрасте ступенями по $(0{,}2—0{,}3)P_{01}$.

Потери предварительного напряжения σ_{epl} определялись расчетно-экспериментальным путем по формуле

$$\sigma_{epl}=[\varepsilon(t_0,\ t_0)—0{,}713P_{01}/A_b\,E_b(t_0)]E_s\,, \qquad (1)$$

где $\varepsilon(t_0,\ t_0)$ — полные деформации бетона, замеренные на уровне центра тяжести напрягаемой арматуры; P_{01} — усилие натяжения арматуры в момент, предшествующий отпуску; A_b — площадь поперечного сечения образца; $E_b(t_0)$ — модуль упругости бетона; E_s — модуль упругости арматурной стали.

Дисперсионный анализ опытных данных с 95%-ной надежностью подтвердил, что уровень напряжения сжатия бетона оказывает существенное влияние на величины полных деформаций, замеренные в момент отпуска натяжения арматуры. Величины потерь от быстронатекающей ползучести не зависят от вида мелкого заполнителя керамзитобетона.

В результате обработки опытных данных методом наименьших квадратов были получены уравнения регрессии:

$$\sigma_{epl}=25{,}5\eta+1{,}05; \qquad (2)$$

$$\sigma_{epl}=27\eta(1+0{,}1\eta^2), \qquad (3)$$

аппроксимирующие опытные данные с ошибками соответственно $c_v=14{,}1\%$ и $c_v=12{,}6\%$.

Расчетные величины потерь предварительного напряжения от быстронатекающей ползучести определялись по СНиП 2.03.01—84 и по формулам (106), (107).

Графики на рис. 1 иллюстрируют изменение опытных и расчетных величин потерь предварительного напряжения арматуры от быстронатекающей ползучести в зависимости от уровня обжатия.

СНиП 2.03.01—84 завышает потери на всем диапазоне уровней обжатия, а формулы (106), (107) обеспечивают хороший результат.

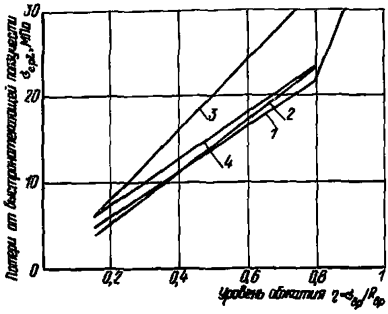


Рис. 1. Потери предварительного напряжения арматуры от быстронатекающей ползучести керамзитобетона на карбонатном песке *1, 2* — опытные зависимости по формулам (2) и (3); *3* — расчетные по СНиП 2.03.01—84; *4* — расчетные по формулам (106) и (107)

Развитие деформаций усадки и потери напряжений в арматуре

Изучение усадки и связанных с ней потерь предварительного напряжения в арматуре осуществляли на ненапрягаемых керамзитожелезобетонных стержнях марки «С» и призмах марки «У». Замеренные в процессе эксперимента значения деформаций усадки стержней (на арматуре) и призм представлены на рис. 2.

Анализ результатов эксперимента показывает, что наличие арматуры и увеличение процента армирования от 1,42 до 2,83% во всех случаях приводит к существенному изменению как характера

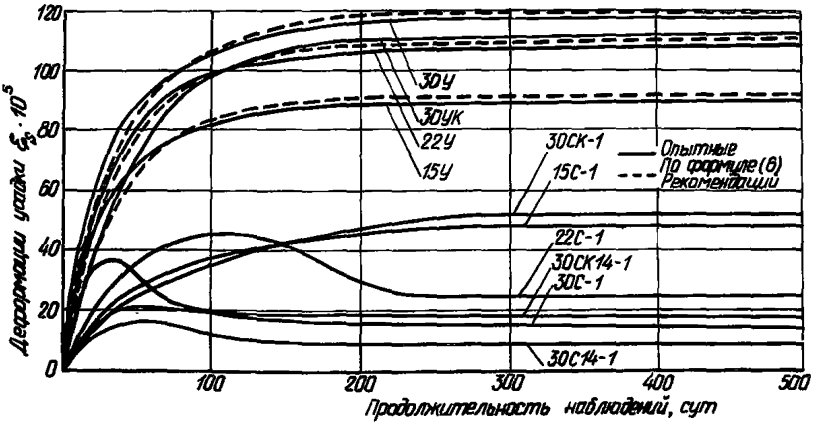


Рис. 2. Деформации усадки керамзитобетонных стержней и призм

развития, так и средних по времени наблюдения значений деформации усадки. С увеличением прочности керамзитобетона конечные величины деформаций усадки ε_s (∞, t_0) неармированных образцов увеличиваются, а армированных — уменьшаются. Последнее объясняется наличием усадочного растрескивания бетона, в результате чего уменьшаются деформации сжатия арматуры. Наибольшие величины деформаций усадки отмечались на арматуре железобетонных стержней из керамзитобетона прочностью 15 МПа на известняковом и из керамзитобетона прочностью 30 МПа на кварцевом песке. Потери преднапряжения от усадки керамзитобетона, подсчитанные по максимальным деформациям арматуры керамзитобетонных стержней, как $\sigma_{\varepsilon s} = \varepsilon_s E_s$, пригодны лишь для ориентировочной оценки в предварительно напряженных элементах. Это связано с тем, что сдерживающее усадку влияние ненапрягаемой арматуры керамзитобетонных стержней марки «С» приводит к растрескиванию бетона и падению напряжений в арматуре. Кроме того, известно, что усадка находящегося в напряженном состоянии бетона, имеет большую по сравнению с ненапряженным бетоном величину. Все это в значительной мере снижает возможности прямого использования данных по ненапряженным стержням для расчета по ним потерь преднапряжения в арматуре.

Расчетные величины потерь предварительного напряжения арматуры от усадки керамзитобетона определялись по формулам (136), (144) с учетом результатов испытания призм марки «У».

Развитие деформаций ползучести и потери напряжения в арматуре

Изучение процесса ползучести и связанных с ним потерь напряжения арматуры осуществляли на керамзитобетонных стержнях марки «СН», деформировавшихся под действием уменьшающихся во времени усилий в напрягаемой арматуре, и на призмах марки «П», сжатых постоянными по величине напряжениями $\sigma_{bp} = 0{,}4R_{bp}$ (2). Деформации ползучести отдельно от усадки не рассматривались: был проведен анализ экспериментальных значений полных длительных (усадка + ползучесть) деформаций и соответствующих им потерь напряжения арматуры.

Представленные на рис. 3—6 графики полных длительных деформаций дают возможность оценить развитие $(\varepsilon_c + \varepsilon_s)$ керамзитобетонных стержней во времени и сравнить их с данными керамзитобетонных призматических неармированных образцов того же состава.

Сравнение величин полных длительных деформаций керамзитобетонных призм и стержней одного состава показывает, что при одинаковом начальном уровне обжатия бетона $\eta = 0{,}4$ текущие значения $\varepsilon(t, t_0)$ образцов-призм, находящихся под действием постоянных по величине напряжений сжатия, значительно превышают деформации соответствующих образцов-стержней, в поперечном сечении которых действующие напряжения сжатия со временем уменьшаются. Так, полные деформации призм из керамзитобетона прочностью 15 МПа превышают полные деформации керамзитобетонных стержней в среднем на 186—284%, а прочностью 22,5 МПа — на 137—148%. Соответствующее превышение для керамзитобетона прочностью 30 МПа на известняковом песке составляет 105—130%; на кварцевом песке — 94—105%.

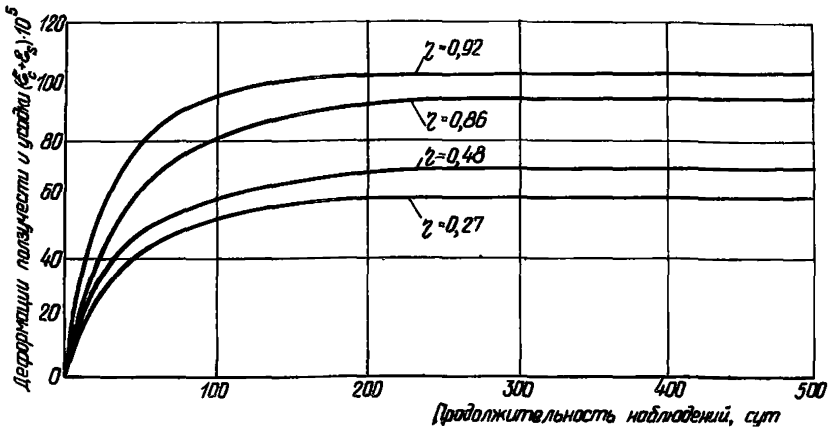


Рис. 3. Деформации ползучести и усадки стержней 15 СН из керамзитобетона прочностью 15 МПа при разных начальных уровнях обжатия

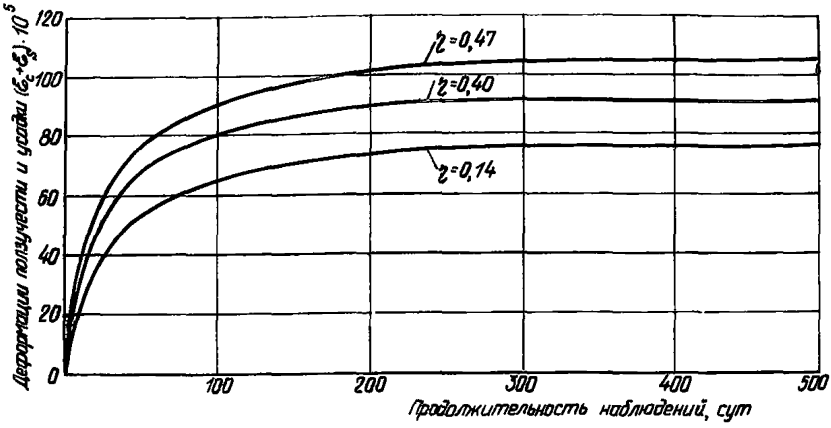


Рис. 4. Деформации ползучести и усадки стержней 22 СН из керамзитобетона прочностью 22,5 МПа при разных начальных уровнях обжатия

На основании однофакторного дисперсионного анализа было установлено, что опытные значения полных деформаций $\varepsilon + \varepsilon_s$ керамзитобетонных стержней марок 15СН, 22СН, 30СН существенным образом зависят от величины уровня обжатия бетона η.

Представленные на рис 7 графики зависимости в возрасте $T=100$ сут $(\varepsilon_c + \varepsilon_s)$ — η носят в основном близкий к линейному характер. Нелинейность полных длительных деформаций образцов марки 15СН начинает проявляться лишь при $\eta > 0{,}8$. Таким обра-

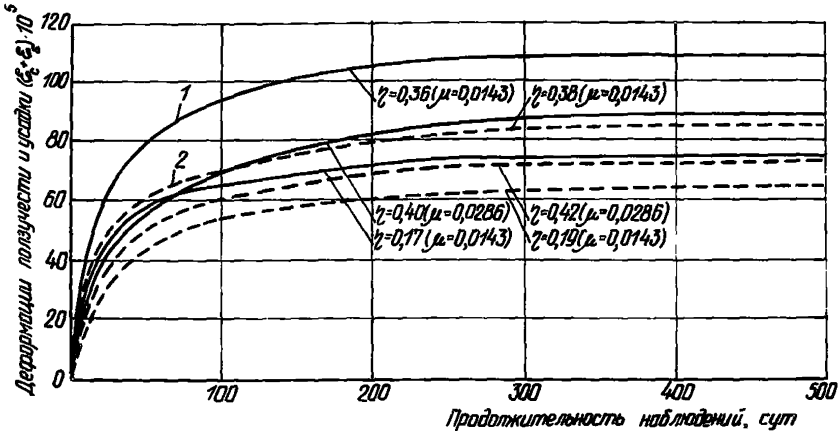


Рис. 5. Деформации ползучести и усадки стержней 30 СН и 30 СНК из керамзитобетона прочностью 30 МПа при разных уровнях обжатия
1 — керамзитобетон на карбонатном песке; *2* — керамзитобетон на кварцевом песке

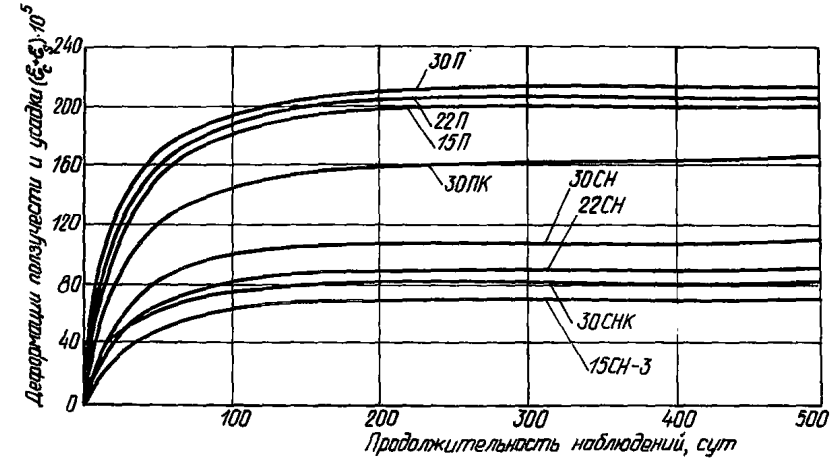


Рис. 6. Деформации ползучести и усадки керамзитобетонных стержней и призм при начальном уровне обжатия $\eta=0,4$

зом, для полных длительных потерь напряжения арматуры керамзитобетонных стержней можно констатировать наличие линейной связи между σ_e —η вплоть до величины $\eta=0,8$. Связь между полными длительными потерями в арматуре и начальным уровнем напряжений сжатия керамзитобетона (при $\eta\leqslant0,8$) удобно записать в форме линейной зависимости:

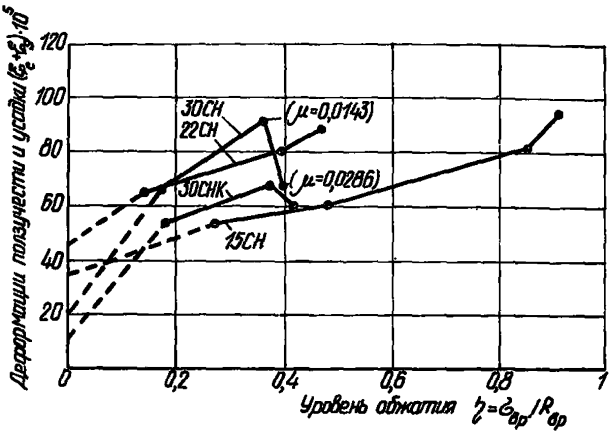


Рис. 7. Деформации ползучести и усадки керамзитобетонных стержней в возрасте $t=100$ сут (без ползучести в момент отпуска натяжения)

$$\sigma_e(t)=E_s[K\eta+\varepsilon_s(t,\ t_0)], \qquad (4)$$

где E_s — модуль упругости напрягаемой арматуры, МПа; $\varepsilon_s\ (t,\ t_0)$ — усадочные деформации, замеренные в возрасте $t-t_0$ сут на арматуре ненапряженных керамзитобетонных стержней-близнецов; K —коэффициент, подбираемый методом наименьших квадратов.

Выражение (4) наиболее точно описывает опытные данные для образцов марок 15СН и 30КСН. Однако во всех случаях ошибка аппроксимации не превышает $c_v=12\%$ (при $\alpha=5\%$). Приняв для описания опытных зависимостей $\sigma_e-\eta$ выражение (4), можно считать, что с достаточной для практических целей точностью потери напряжения от усадки бетона могут быть определены по деформациям арматуры ненапряженных образцов. Кроме того, констатируя наличие линейной связи $\varepsilon-\eta$, можно считать подтвердившимся известное положение о том, что напрягаемая арматура керамзитобетонных элементов оказывает на усадочные деформации бетона тормозящее действие, численно равное разности деформаций неармированных призм и армированных ненапрягаемой арматурой образцов, выполненных из бетона одного состава и прочности и хранящихся в одинаковых условиях. При этом, наименьшую ошибку предположения дадут деформации тех керамзитобетонных ненапрягаемых стержней, на поверхности которых отсутствуют усадочные трещины. В соответствии с изложенным резкое снижение значений полных длительных деформаций стержней марки 30СН при $\eta=0{,}4$ и стержней марки 30КСН при $\eta=0{,}42$ (см. рис. 7) объясняется переходом в них на напрягаемую арматуру диаметром 14 мм, который оказывает большее по сравнению с арматурой диаметром 10 мм тормозящее действие на развитие усадки керамзитобетона.

Влияние вида мелкого заполнителя керамзитобетона и уровня напряжений сжатия на величины полных длительных деформаций

образцов в возрасте $t=100$ сут исследовали по двухфакторной схеме. Использовали данные образцов из керамзитобетона прочностью 30 МПа на известняковом и кварцевом песках. Анализ показал, что зависимость деформаций $\varepsilon_c + \varepsilon_s$ от уровня напряжений η и вида мелкого заполнителя бетонов, а также от взаимодействия этих факторов значима в 95 из 100 случаев.

На рис. 10 приводятся величины полных потерь напряжения арматуры керамзитобетонных стержней, вызванные ползучестью и усадкой керамзитобетона в зависимости от уровня обжатия η. Там же представлены величины потерь, нормируемые СНиП 2.03.01—84 и рассчитанные по формулам (106), (108), (136) и (144). Максимальные полные потери в эксперименте не превышали 36,5—50,4% от σ_{sp} для элементов из керамзитобетона на известняковом песке и 38,3—46,2% от σ_{sp} для элементов из керамзитобетона на кварцевом песке. На основании проделанных опытов для практических целей можно рекомендовать использование величин начальных уровней напряжений сжатия бетона в пределах $0{,}2<\eta\leqslant 0{,}8$.

Внецентренно обжатые элементы (балки) и центрально обжатые элементы (стержни)

Экспериментальное исследование влияния длительных процессов на деформированное состояние и потери напряжения в арматуре керамзитобетонных балок на карбонатном песке Б, БН и стержней С, СН проводили по схеме однофакторного дисперсионного анализа. Фактор «А» — относительное начальное напряжение сжатия бетона на уровне центра тяжести напрягаемой арматуры ($\eta=0$—1; 0,2—2; 0,4—3). Для каждого уровня принимали 2—4 шт. образца. Объектом изучения были железобетонные балки размером $10\times20\times220$ см и центрально армированные железобетонные стержни размером $10\times10\times60$ см с одиночной ненапрягаемой арматурой 2 Ø 10 А-IIIв. Для сопоставления изготовляли также образцы СК, СНК, БК, БНК из керамзитобетона на кварцевом песке. Балки и стержни изготовляли на стенде одновременно и хранили в дальнейшем в одинаковых условиях. Для контроля прочности, модуля упругости и длительной деформативности керамзитобетона была изготовлена серия кубов и призм (дополнительные образцы). Все образцы выполнены из керамзитобетона естественного твердения прочностью 22,5 МПа на быстротвердеющем цементе (состав 2 прил. 3).

Результаты испытания кубов и призм в момент спуска натяжения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вид бетона	R^N, МПа	R_b^N, МПа	E_b, МПа	E_s, МПа
Керамзитобетон на карбонатном песке	21,6	14,8	$11{,}5\cdot10^4$	$20{,}1\cdot10^4$
Керамзитобетон на кварцевом песке	22,2	15,9	$13{,}8\cdot10^4$	$20{,}1\cdot10^4$

В возрасте $t_0=2$ сут усилие натяжения арматуры передавали на бетон балок и стержней плавно, без выдержки.

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОТЕРИ ОТ БЫСТРОНАТЕКАЮЩЕЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Фактические напряжения в бетоне нижней зоны балок подсчитывали по формуле

$$\sigma_{bp}=1{,}1\sigma_{bp}^{th}/(1+0{,}42\sigma_{bp}^{th}/R_{bp}), \qquad (5)$$

в которой $\sigma_{bp}^{th}=\varepsilon(t,\ t_0)\ E_b(t_0)$, (6)

где $\varepsilon(t,\ t_0)$ — полные за время отпуска натяжения деформации бетона, замеренные на уровне центра тяжести напрягаемой арматуры.

Затем определяли упругие деформации бетона

$$\varepsilon_0=\sigma_{bp}/E_b(t_0). \qquad (7)$$

Подсчет фактических напряжений упругого обжатия бетона керамзитобетонных стержней осуществляли по формуле

$$\sigma_{bp}=P_{01}/A_b. \qquad (8)$$

После чего пластические потери напряжения в арматуре при отпуске натяжения вычисляли по СНиП 2.03.01—84 и формулам (2), (3) и (106), (107) основного текста. Графическая интерпретация результатов приведена на рис. 1.

Деформированное состояние и потери от быстронатекающей ползучести

Усадку изучали на балках Б-1, БК-1, стержнях С-1, СК-1, армированных ненапрягаемой арматурой класса А-IIIв, и призмах «У». На рис. 8 представлены графики деформаций усадки опытных образцов. Характер развития усадки здесь, как и в предыдущих опытах, в значительной мере зависел от типа мелкого заполнителя бетона, а также от наличия и количества арматуры. С увеличением количества арматуры величина усадочных деформаций становится меньше. Так, если усадка бетона верхней зоны балок на известняковом песке, где установлены два арматурных стержня ϕ5 В-1, оказалась незначительно отличимой от усадки неармированных керамзитобетонных призм, то деформации, замеренные на арматуре и бетоне нижней зоны тех же балок, были ниже деформаций бетона верхней зоны. Последнее, как было отмечено ранее, тесно связано с растрескиванием бетона керамзитожелезобетонных элементов вследствие усадки. Как видно из рис. 8, деформации усадки нижней зоны балок на карбонатном песке плавно растут до возраста $t=40$—60 сут, затем начинают снижаться. Расхождение между ними увеличивается и к концу эксперимента достигает $16\cdot10^{-5}$, или 91,5%. Максимальные напряжения сжатия, вызванные усадкой бетона, достигли в арматуре, согласно опытным данным, величины $\sigma_s=33{,}75\cdot10^{-5}\cdot20{,}1\cdot10^4=67{,}9$ МПа, снижаясь к концу эксперимента до значения $\sigma_s=17{,}5\cdot10^{-5}\cdot20{,}1\cdot10^4=35{,}2$ МПа. Усадочные напряжения в арматуре керамзитобетонных на карбо-

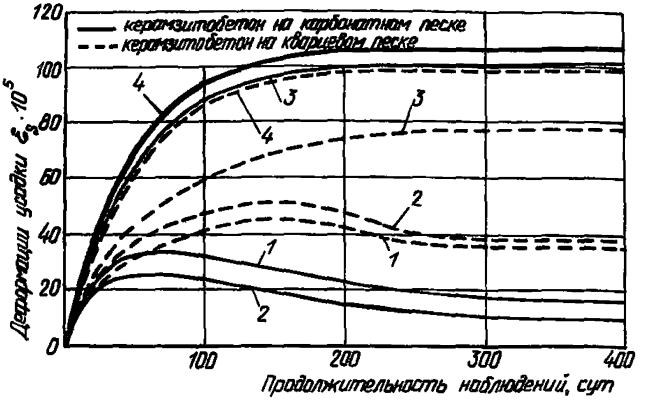


Рис. 8. Деформации усадки керамзитобетонных балок и стержней замеренные на
1 — нижней арматуре балок; *2* — арматуре стержней; *3* — бетоне верхней зоны; *4* — бетоне призм

натном песке стержней имели меньшую по сравнению с балками величину $\sigma_s = 26{,}25 \cdot 10^{-5} \cdot 20{,}1 \cdot 10^4 = 52{,}8$ МПа, что связано, по-видимому, с большим насыщением арматурой их поперечного сечения. Процент армирования стержней составлял $\mu = 1{,}42\%$ по сравнению с $\mu = 0{,}71\%$ в балках. Растрескивание бетона проходило здесь более интенсивно и началось раньше. Максимальные опытные напряжения сжатия арматуры у стержней и балок на кварцевом песке достигли величины $\sigma_s = 90{,}5$—$99{,}5$ МПа.

В целом исследование усадочных деформаций армированных ненапрягаемой арматурой образцов не дает возможности точно оценить потери напряжения от усадки керамзитобетона в арматуре предварительно напряженных керамзитожелезобетонных конструкций. Однако полученные результаты позволяют утверждать, что эти потери в рамках данного эксперимента будут, по крайней мере, не ниже полученных из опыта значений максимальных напряжений сжатия арматуры $\sigma_{es} = 67{,}9$ МПа для элементов из керамзитобетона на карбонатном песке и $\sigma_{es} = 99{,}5$ МПа для элементов из керамзитобетона на кварцевом песке.

Развитие деформаций ползучести и потери напряжения в арматуре

Влияние ползучести на деформирование и величину потерь напряжения в арматуре изучали на опытных керамзитобетонных балках (БН-2; 3; БНК-2; 3) и стержнях (СН-2; 3; СНК-2; 3), армированных предварительно напряженной арматурой из стали класса А-IIIв. Для сравнения были изготовлены и загружены постоянными по величине напряжениями $\sigma_{bp} = 0{,}4R_{bp}$ керамзитобетонные призмы одинакового состава с балками, стержнями и хранящиеся в одинаковых условиях.

Поскольку, как отмечалось выше, оценка зависящей от усадки доли потерь предварительного напряжения арматуры железобетонных конструкций может быть только приблизительной, был проведен анализ полученных из опыта величин полных длительных (усадка+ползучесть) деформаций бетона и арматуры образцов. На рис. 9 представлены графики средних величин полных длительных деформаций исследованных в эксперименте образцов. Дисперсионный анализ позволил установить, что величина полных потерь напряжения в арматуре опытных образцов, подвергнутых действию только усилий предварительного обжатия, не зависит от формы эпюры напряжений в бетоне. Установлено, что увеличение уровня η обжатия бетона арматурой приблизительно в 2 раза приводит к росту потерь в 1,11—1,3 раза. При одинаковом начальном уровне обжатия керамзитобетона полные деформации призм, загруженных постоянными по величине напряжениями, в 1,4...1,73 раза превышают деформации, замеренные в нижней зоне балок.

Анализ сопоставления опытных потерь предварительного напряжения от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке (рис. 10) с вычисленными показал, что СНиП занижает потери при низких уровнях обжатия на величину около 30%, что может быть отнесено за счет повышенной усадки керамзитобетона на карбонатном песке. При нормировании потерь преднапряжения от усадки керамзитобетона на карбонатном песке величиной 100 МПа суммарные потери от ползучести и усадки по СНиП 2.03.01—84 в этом случае при уровне обжатия $\eta \approx 0{,}7$ дают превышение на 30% над опытными величинами. Расчет потерь предварительного напряжения по формулам (106), (108), (136) и (144) при уровнях обжатия от 0,15 до 0,8 дает хорошее совпадение с опытными величинами. Превышение в среднем составило 2,8%.

Полученный в экспериментах фактический материал дает возможность оценки величин полных потерь напряжения в арматуре керамзитожелезобетонных элементов исходя непосредственно из параметров состава бетонной смеси. Для этой цели используются выборки опытных значений $u(t)=\varepsilon^{\nu}(t)/\varepsilon^{b}(t)$, представляющих собой отношение полных (усадка плюс ползучесть) деформаций, замеренных на арматуре предварительно напряженного элемента, к деформациям бетонных призм-близнецов, находящихся в одинаковых с железобетонным элементом условиях окружающей среды при одинаковом начальном уровне напряжений обжатия (η). Предполагается, что $u(t)$ не зависит от типа цемента и конкретного значения η. Используя опытные средние данные для образцов 15СН-3, 22СН-3, 30СН-3, БН-3 и СН-3 были подсчитаны значения $u(t)$ при t=3, 7, 14, 28, ... 100, ... 200, ... 300, ... 400 сут и осуществлен статистический анализ полученных выборок. Установлено, что $u(t)$ не зависит от типа мелкого заполнителя и увеличивается с увеличением прочности керамзитобетона. По причине значительного внутрисерийного рассеяния величин $u(t)$ c_v =21%, от-

Сутки	28	60	120	180	360	∞
$u(t)$	0,594	0,599	0,61	0,613	0,611	0,621

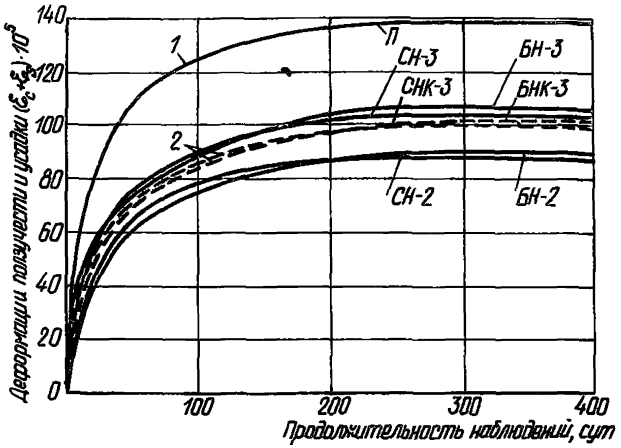


Рис. 9. Деформации ползучести и усадки, замеренные на арматуре предварительно напряженных керамзитобетонных балок и стержней (без ползучести в момент отпуска натяжения)
1 — керамзитобетон на карбонатном песке; *2* — керамзитобетон на кварцевом песке

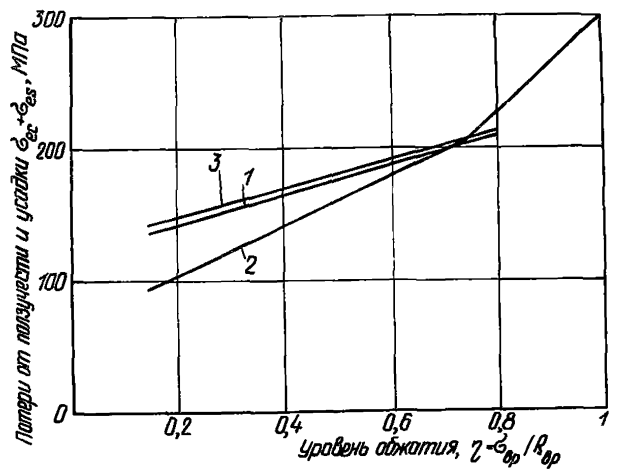


Рис. 10. Потери предварительного напряжения в арматуре от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке (без потерь преднапряжения от быстронатекающей ползучести)
1 — опытные величины; *2* — по СНиП 2.05.01—84; *3* — по формулам (106), (108), (136) и (144)

носящихся к одной прочности бетона, принято решение использовать верхнюю доверительную границу одностороннего интервала среднего значения $u(t)$. Ниже представлены 95%-ные верхние доверительные границы одностороннего интервала среднего значения для бетона прочностью 15—30 МПа, которые, как можно заметить, весьма незначительно возрастают с возрастом t.

С помощью этих значений, используя полученные ранее регрессионные зависимости $\varepsilon_s\ (t,\ t_0)$ и $C(t,\ t_0)$, получаем величину полных потерь предварительного напряжения арматуры $\sigma_e\ (t)$ от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке.

$$\sigma_e(t)=u(t)\,[\varepsilon_s\ (t,\ t_0)+C(t)\sigma_b\,(t,\ t_0)]E_s\,. \qquad (9)$$

Подсчитанные таким способом значения $\sigma_e\ (t)$ достаточно близки к опытным данным. Ошибка аппроксимации составила: $c_v = 18{,}9\%$.

Приложение 5

Примеры расчетного определения потерь предварительного напряжения от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке

Пример 1. Определение потерь предварительного напряжения в в железобетонном элементе с симметричным армированием.

Дано. Нижний пояс фермы. Сечение прямоугольное $h=0{,}2$ м; $b=0{,}25$ м. Материал — керамзитобетон на карбонатном песке класса В25, ОК=3 см. Напрягаемая арматура — стержневая класса А-IV. $E_s=1{,}9\cdot10^5$ МПа; $A_{sp}=8{,}04\cdot10^{-4}$ м². Арматура расположена симметрично относительно главных центральных осей сечения. Натяжение производится на упоры. Бетон подвергается пропариванию. Передаточная прочность бетона $R^N_{bp}\ (t_0)=22$ МПа. Напряжение в арматуре после окончания обжатия $\sigma_{sp}=510$ МПа. Расчетная влажность воздуха 80%. На 60-й день после отпуска натяжных приспособлений к ферме прикладывается эксплуатационная нагрузка, которая вызывает растягивающее усилие в нижнем поясе $N=0{,}35$ МН.

Определить: потери предварительного напряжения вследствие ползучести и усадки:

через неограниченно большой период времени;

на 60-й день после отпуска натяжных приспособлений (к моменту приложения эксплуатационной нагрузки).

Расчет характеристики бетонного сечения: $A_b=0{,}05$ м²; периметр $\Pi=0{,}9$ м. Модуль открытой поверхности $M_0=0{,}9/0{,}05=18\ \text{м}^{-1}$, $\mu_p=8{,}04\cdot10^{-4}/0{,}05=0{,}0161$.

Согласно табл. 17, с учетом термообработки $E_b=E_b\,(28)=21\cdot10^3\cdot0{,}9=18{,}9\cdot10^3$ МПа; $\alpha=1{,}9\cdot10^5/18{,}9\cdot10^3=10{,}05$.

Приведенная площадь сечения $A_{red}=0{,}05+10{,}05\cdot8{,}04\cdot10^{-4}=0{,}058$ м². Усилие предварительного обжатия $P_0=510\cdot8{,}04\cdot10^{-4}=0{,}41$ МН. Начальные напряжения в бетоне $\sigma_b=0{,}41/0{,}058=$

$=7{,}07$ МПа. Приведенный возраст бетона вычисляем по формулам (89) и (90): $\xi_t=(1-0{,}0779\cdot 22/25)(2+0{,}045\cdot 25)=0{,}981$, $t_0=14(2-0{,}981)/(1+0{,}981)=7{,}2$ сут. Принимаем $t_0=7$ сут. Для этого возраста при классе бетона В25 по табл. 16 определяем $R_{bn}=18{,}5$ МПа, $R_b^N=18{,}5/0{,}779=23{,}75$ МПа.

По табл. 18 с учетом термообработки находим:

$$C^N(\infty, 28)=107\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}9=96{,}3\cdot 10^{-6}\text{МПа}^{-1};$$

$$\varepsilon_S^N(\infty, 7)=90\cdot 10^{-5}\cdot 0{,}9=81\cdot 10^{-5},$$

Согласно табл. 19—21, для ползучести $\xi_2=0{,}87$; $\xi_3=0{,}75$; для усадки $\xi_1=1$; $\xi_2=0{,}925$; $\xi_3=0{,}7$.

По формулам (83) и (84) получаем расчетные предельные значения меры ползучести и относительной деформации усадки:

$$C(\infty, 28)=96{,}3\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}87\cdot 0{,}75=62{,}8\cdot 10^{-6}\ \text{МПа}^{-1};$$

$$\varepsilon_s(\infty, 7)=81\cdot 10^{-5}\cdot 1\cdot 0{,}925\cdot 0{,}7=52{,}45\cdot 10^{-5}.$$

По формуле (94) определим значение предельной характеристики ползучести: $\varphi=18{,}9\cdot 10^3\cdot 62;\ 8\cdot 10^{-6}=1{,}187$.

Значение ρ_1, определяемое по формуле (105), равно 1.

По формулам (121) и (123) вычисляем:

$$\overline{\lambda}=0{,}0161\cdot 1\cdot 10{,}05/(1+0{,}0161\cdot 1\cdot 10{,}05)=0{,}1394;$$

$$\varphi_s=0{,}1394\cdot 1{,}187=0{,}1655.$$

Уровень обжатия бетона $\eta(t_0)=7{,}07/\Gamma\cdot 0{,}0161=0{,}3<0{,}75$.

По прил. 11 найдем $H^*_b(\infty, 7)=0{,}8081$. По формуле (110) $u_c=1-0{,}8081=0{,}1919$. С помощью формулы (106) вычислим потери предварительного напряжения от ползучести при действии усилия предварительного напряжения $\sigma_{ec}=7{,}07\cdot 0{,}1919/1\cdot 0{,}0161=84{,}27$ МПа. Потери предварительного напряжения от усадки находим согласно разд. 8.

По формуле (142) определяем $\varphi_s(\infty)=0{,}5\cdot 0{,}1394\cdot 18{,}9\cdot 10^3\times 62{,}8\cdot 10^{-6}=0{,}0827$.

Согласно формуле (140) $H_s(\infty)=1/(1+0{,}0827)=0{,}9236$.

По формуле (138) $u_s=0{,}9236\cdot e^{-0{,}0062\cdot 7}=0{,}8844$.

Значение $\alpha_s=0{,}0062$ определяем по табл. 22.

Величину потерь предварительного напряжения от усадки при $t\to\infty$ вычисляем по формуле (136):

$$\sigma_{es}=1{,}9\cdot 10^5\cdot 52{,}45\cdot 10^{-5}/(1+0{,}0161\cdot 1\cdot 10{,}05)0{,}8844=75{,}85\ \text{МПа}.$$

Начальное напряжение в бетоне, вызванное эксплуатационной нагрузкой, $\sigma_b=-0{,}35/0{,}058=-6{,}04$ МПа.

По прил. 11 для $\varphi_s=0{,}1655$ и $t_0=67$ сут находим значение коэффициента затухания $H^*_b(\infty, 67)=0{,}8793$.

По формуле (110) $u_c=1-0{,}8793=0{,}1207$.

Согласно формуле (106), $\sigma_{ec}=-6{,}04\cdot 0{,}1207/0{,}0161\cdot 1=-45{,}28$ МПа.

Суммарная величина потерь предварительного напряжения при $t\to\infty\ \sigma_c=84{,}27+75{,}85-45{,}28=114{,}84$ МПа.

Определим потери, происходящие за промежуток времени 60 сут.

По формуле (86) определим $C^*(67,28)=62,8\cdot10^{-6}\cdot1[1-0,85e^{-0,0076(67-28)}]=23,11\cdot10^{-6}$ МПа. Значение $\gamma_1=0,0076$ принимаем по табл. 23.

По формуле (91) определяем $\varphi(67,28)=18,9\cdot10^3\cdot23,11\cdot10^{-6}=0,4368$.

Значение $\varphi_s(67,28)=0,1394\cdot0,4368=0,0609$.

По прил. 11 для $\varphi_s=0,0609$ и $t_0=7$ сут определяем $H^*_b(\infty, 7)=0,9299$. По формуле (125) $u_c=(1-0,15\cdot0,0609)(1-0,9299)=0,0695$.

Согласно формуле (106), $\sigma_{ec}=7,07\cdot0,0695/0,0161\cdot1=30,52$ МПа.

Для определения потерь от усадки за то же время по табл. 22 определим значение $\alpha_s=0,0076$, а затем по формуле (144) $u_c=e^{-0,0076\cdot7}\cdot0,9236[1-e^{-0,0076(67-7)}]=0,3207$.

За 60 сут по формуле (136)

$$\sigma_{es}=1,9\cdot10^5\cdot52,45\cdot10^{-5}\cdot0,3207/(1+0,0161\cdot1\cdot10,05)=27,51 \text{ МПа}.$$

Суммарные потери за время $t-t_0=60$ сут; $\sigma_e=\sigma_{ec}+\sigma_{es}=30,52+27,51=58,03$ МПа.

Пример 2. Определение потерь предварительного напряжения арматуры в железобетонном элементе с одиночным армированием.

Дано. Ребристая панель перекрытия, характеристики бетонного сечения: $A_b=0,1144$ м^2; $I_b=0,000783$ м^4; периметр сечения $\Pi=4,06$ м; $h_1=0,183$ м. Расчетный пролет 5,5 м. Материал — керамзитобетон на карбонатном песке класса В20. ОК=4—5 см.

Напрягаемая арматура класса Ат-V, $E_s=1,9\cdot10^5$ МПа, $A_{sp}=4,02\cdot10^{-4}$ м^2.

Натяжение производится на упоры. Бетон подвергается пропариванию. Передаточная прочность бетона $R^N_{bp}(t_0)=17$ МПа. Напряжение в арматуре к моменту окончания обжатия $\sigma_{sp}=613$ МПа.

Нагрузка на панель: постоянная от собственного веса $g=0,004$ МН/м; эксплуатационная нагрузка, прикладываемая в возрасте бетона 60 сут $q=0,0075$ МН/м. Расчетная влажность воздуха 70%.

Определить: потери, вызванные ползучестью и усадкой;

через неограниченно большой период времени;
к моменту приложения эксплуатационной нагрузки.

Расчет. Модуль открытой поверхности $M_0=35,5$ м$^{-1}$, $\mu_p=0,0036$. По формуле (105)

$$\rho_1=1+0,1144\cdot0,183^2/0,000783=5,89.$$

Согласно табл. 17, $E_b=E_b(28)=17,45\cdot10^3$ МПа.

С учетом термообработки $E_b=17,45\cdot10^3\cdot0,9=15,71\cdot10^3$ МПа, $\alpha=1,95\cdot10^5/15,71\cdot10^3=12,1$.

Значения характеристик приведенного сечения вычисляем по формулам (95), (98):

$$A_{red}=0,1144+4,02\cdot10^{-4}/12,1=0,1192 \text{ м}^2;$$

$I_{red} = I_b + \alpha A_{sp} y^2_{sp} = 0{,}000783 + 12{,}1 \cdot 4{,}02 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}1754^2 = 0{,}000933$ м^4,

где $y_{sp} = h_1/(1+\mu_p\alpha) = 0{,}183/(1+0{,}0036 \cdot 12{,}1) = 0{,}1754$ м.

Усилие предварительного обжатия вычисляем по формуле (102): $p_0 = 613 \cdot 4{,}02 \cdot 10^{-4} = 0{,}246$ МН. Напряжения σ_b, возникающие в бетоне при действии усилий предварительного обжатия, вычисляем по формуле (100) при $M=0$ и $N=0$.

$$\sigma_b = 0{,}246 \cdot 0{,}1192 + 0{,}246 \cdot 0{,}1754 \cdot 0{,}1754/0{,}000933 = 10{,}17 \text{ МПа},$$

где величина эксцентриситета $e_{op} = 0{,}1754$ м вычисляется по формуле (103). В данном случае $e_{op} = y_{sp}$.

Изгибающий момент в середине пролета от собственного веса $M = 0{,}004 \cdot 5{,}5^2/8 = 0{,}015$ МН·м. По формуле (100) при $M = 0{,}015$ МН·м определяем суммарные напряжения в бетоне от усилия предварительного обжатия и собственного веса:

$$\sigma_b = 0{,}246/0{,}1192 + (0{,}246 \cdot 0{,}1754 - 0{,}015)\,0{,}1754/0{,}000933 = 7{,}35 \text{ МПа}.$$

Приведенный возраст бетона вычисляем по формулам (89), (90)

$$\varepsilon_t = [1 - 0{,}779 \cdot 17/20]\,(2 + 0{,}045 \cdot 20) = 0{,}9802;$$

$t_0 = 14(2 - 0{,}9802)/(1 + 0{,}9802) = 7{,}21$ сут. Принимаем $t_0 = 7$ сут.

Для этого возраста при классе бетона В20 по табл. 16

$R_{br} = 15$ МПа. $R_b^N = 15/0{,}779 = 19{,}26$ МПа. С учетом термообработки по табл. 18 находим: $C^N(\infty, 28) = 128 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}9 = 115{,}2 \times \times 10^{-6}$ МПа$^{-1}$; $\varepsilon_S^N = 105 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}9 = 94{,}5 \cdot 10^{-5}$

По табл. 19—21 для ползучести $\xi_2 = 1{,}05$; $\xi_3 = 0{,}85$; для усадки $\varepsilon_1 = 1$; $\xi_2 = 1{,}06$; $\xi_3 = 0{,}85$.

По формулам (83), (84) вычисляем расчетные предельные значения меры ползучести и относительной деформации усадки:

$$C^*(\infty, 28) = 115{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}85 = 102{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{МПа}^{-1};$$

$$\varepsilon_S(\infty, t_w) = 94{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 1{,}06 \cdot 0{,}85 = 85{,}15 \cdot 10^{-5}.$$

Предельная характеристика определяется по формуле (94) $\varphi = 102{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 15{,}71 \cdot 10^3 = 1{,}615$. По формулам (121), (123) находим $\bar{\lambda} = 0{,}0036 \cdot 5{,}89 \cdot 12{,}1/(1 + 0{,}0036 \cdot 5{,}89 \cdot 12{,}1) = 0{,}204$; $\varphi_S = 0{,}204 \cdot 1{,}615 = = 0{,}33$.

По прил. 11 для $M_0 = 35{,}5$ м$^{-1}$ и $t_0 = 7$ сут $H^*_b(\infty, 7) = 0{,}6403$.

По формуле (110) $u_c = 1 - 0{,}6404 = 0{,}3597$.

С помощью формулы (106) вычислим усилия предварительного обжатия от ползучести $\sigma_{ec} = (10{,}17/0{,}0036 \cdot 5{,}89)\,0{,}3597 = 172{,}5$ МПа. Суммарные потери от действия усилий предварительного обжатия и собственного веса $\sigma_{ec} = (7{,}35/0{,}0036 \cdot 5{,}89)\,0{,}3597 = 124{,}7$ МПа. Изгибающий момент от нагрузки, прикладываемой в возрасте $t_1 = = 60$ сут:

$$M = 0{,}0075 \cdot 5{,}5^2/8 = 0{,}0284 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

По формуле (100) $\sigma_b = -(0{,}0284 \cdot 0{,}1754/0{,}000933) = -5{,}34$ МПа.

Для $M_0=35{,}5$ м$^{-1}$, $t_0=60$ сут, $\varphi_s=0{,}33$ по прил. (11) $H^*_b(\infty, 60)=0{,}7627$. По формуле (110) $u_c=1\cdot 0{,}7627=0{,}2373$. Потери вычисляем по формуле (106): $\sigma_{ec}=(-5{,}34/0{,}0036\cdot 5{,}89)\times$ $\times 0{,}2373=-59{,}76$. Потери от усадки находим в соответствии с рекомендациями разд. 8.

По формуле (142) $\varphi_s(\infty)=0{,}5\cdot 0{,}204\cdot 15{,}71\cdot 10^3\cdot 102{,}8\cdot 10^{-6}=$ $=0{,}1647$. По формуле (140) $H_s(\infty)=1/(1+0{,}1647)=0{,}8586$. Согласно табл. 22, $\alpha_s=0{,}0117$. По формуле (138) $u_s=e^{-0{,}0117\cdot 7}\times$ $\times 0{,}8586=0{,}791$.

Величину потерь от усадки вычисляем по формуле (136):

$$\sigma_{es}=1{,}9\cdot 10^5\cdot 85{,}15\cdot 10^{-5}\cdot 0{,}791/(1+0{,}0036\cdot 5{,}89\cdot 12{,}1)=101{,}81 \text{ МПа}.$$

Суммарные потери $\sigma_e=124{,}7-59{,}76+101{,}8=166{,}74$ МПа.

Для определения потерь, происходящих за промежуток времени от $t_0=7$ сут до $t_1=60$ сут, по табл. 23 для $M_0=35{,}5$ м$^{-1}$, $\gamma_1=$ $=0{,}00955$.

На основании формулы (86) $C^*(60,28)=102{,}8\cdot 10^{-6}[1-$ $-0{,}85e^{-0{,}00955(60-28)}]=38{,}43\cdot 10^{-6}$ МПа$^{-1}$. По формуле (91) $\varphi_s(60,28)=15{,}71\cdot 10^3\cdot 38{,}43\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}204=0{,}123$.

По прил. 11 для $\varphi_s=0{,}123$, $t_0=7$ сут $H_b^*(\infty, 7)=0{,}8423$. По формуле (125) вычислим $u_c=(1-0{,}15\cdot 0{,}123)(1-0{,}8423)=0{,}1548$.

По (106) найдем потери от усилий предварительного обжатия и собственного веса:

$$\sigma_{ec}=7{,}35\cdot 0{,}1548/0{,}0036\cdot 5{,}89=53{,}66 \text{ МПа}.$$

Потери от усадки бетона за то же время вычисляем следующим образом. По формуле (144) $u_s=e^{-0{,}0117\cdot 7}\cdot 0{,}8586[1-e^{-0{,}0117(60-7)}]=$ $=0{,}366$. Затем по формуле (136) $\sigma_{es}=1{,}9\cdot 10^5\cdot 85{,}15\cdot 10^{-5}\times$ $\times 0{,}366/(1+0{,}0036\cdot 5{,}89\cdot 12{,}1)=47{,}11$ МПа. Суммарные потери за время $t_1-t_0=60-7=53$ сут будут $\sigma_e=53{,}66+47{,}11=100{,}8$ МПа.

Приложение 6

t-распределение

Число степеней свободы	Вероятности						
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,73	1,38	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
2	0,62	1,06	1,89	2,92	4,3	6,96	9,92
3	0,58	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	0,57	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,6
5	0,56	0,92	1,48	2,01	2,57	3,36	4,03
6	0,55	0,91	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71

Продолжение прил. 6

Число степеней свободы	Вероятности						
	0.7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
7	0,55	0,90	1,42	1,9	2,36	3	3,5
8	0,55	0,89	1,4	1,86	2,31	2,9	3,36
9	0,54	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
10	0,54	0,88	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17
11	0,54	0,88	1,36	1,8	2,2	2,72	3,11
12	0,54	0,87	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
13	0,54	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
14	0,54	0,87	1,34	1,76	2,14	2,62	2,98
15	0,54	0,87	1,34	1,75	2,13	2,6	2,95
16	0,54	0,86	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
17	0,53	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,9
18	0,53	0,86	1,33	1,73	2,1	2,55	2,88
19	0,53	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
20	0,53	0,86	1,32	1,72	2,09	2,53	2,84
21	0,53	0,86	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83
22	0,53	0,86	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82
23	0,53	0,86	1,32	1,71	2,07	2,5	2,81
24	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,8
25	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,48	2,79
26	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78
27	0,53	0,86	1,31	1,7	2,05	2,47	2,77
28	0,53	0,86	1,31	1,7	2,05	2,47	2,76
29	0,53	0,85	1,31	1,7	2,04	2,46	2,76
30	0,53	0,85	1,31	1,7	2,04	2,46	2,75
40	0,53	0,85	1,3	1,68	2,02	2,42	2,7

Продолжение прил. 6

Число степеней свободы	Вероятности						
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
50	0,53	0,85	1,3	1,67	2,01	2,4	2,68
60	0,53	0,85	1,3	1,67	2	2,39	2,66
80	0,53	0,85	1,29	1,66	1,99	2,37	2,64
100	0,53	0,84	1,29	1,66	1,98	2,36	2,63
200	0,52	0,84	1,29	1,65	1,97	2,34	2,6
500	0,52	0,84	1,28	1,65	1,96	2,33	2,59
∞	0,52	0,84	1,28	1,64	1,96	2,33	2,58

Приложение 7

F-распределение ($\alpha = 0{,}05$)

f_2	f_1								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234	244,9	249	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5	4,7	4,5	4,4
6	6	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4

f_2	f_1								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,6	3,7	3,3	3,1	3	2,9	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3	2,9	2,7	2,4	2,2	2
17	4,5	3,6	3,2	3	2,8	2,7	2,4	2,2	2
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2	1,8
24	4,3	3,4	3	2,8	2,6	2,5	2,2	2	1,7
26	4,2	3,4	3	2,7	2,6	2,5	2,2	2	1,7
28	4,2	3,3	3	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2	1,8	1,5
60	4	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
∞	3,8	3	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1

σ-распределение ($\alpha = 0{,}05$)

f_2	f_1 = 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	∞
2	0,9985	0,975	0,9392	0,9057	0,8772	0,8534	0,8332	0,8159	0,801	0,788	0,7341	0,5
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771	0,653	0,6333	0,6167	0,6025	0,5466	0,3333
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017	0,4884	0,4366	0,25
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4783	0,4564	0,4387	0,4241	0,4118	0,3645	0,2
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,398	0,3817	0,3682	0,3568	0,3135	0,1667
7	0,7271	0,5612	0,48	0,4307	0,3974	0,3726	0,3535	0,3384	0,3259	0,3154	0,2756	0,1429
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3919	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926	0,2829	0,2462	0,125
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067	0,2901	0,2768	0,2659	0,2568	0,2226	0,1111
10	0,602	0,445	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439	0,2353	0,2032	0,1
12	0,541	0,3924	0,3264	0,288	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098	0,202	0,1737	0,0833
16	0,4546	0,3218	0,2648	0,2319	0,2103	0,1948	0,1829	0,1736	0,166	0,1597	0,1365	0,0634
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357	0,1303	0,1108	0,05
24	0,3434	0,2354	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374	0,1286	0,1216	0,116	0,1113	0,0942	0,0417
30	0,2929	0,198	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137	0,1061	0,1002	0,0958	0,0921	0,0771	0,0333
40	0,237	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887	0,0827	0,078	0,0745	0,0713	0,0595	0,025
∞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Приложение 9

x^2-распределение

f	α								
	99	95	90	50	10	5	1	0,5	0,1
1	0,0002	0,0039	0,0158	0,455	2,71	3,84	6,63	7,88	10,8
2	0,0201	0,103	0,211	1,39	4,61	5,99	9,21	10,6	13,8
3	0,115	0,352	0,584	2,37	6,25	7,82	11,3	12,8	16,3
4	0,297	0,711	1,06	3,36	7,78	9,49	13,3	14,9	18,5
5	0,554	1,15	1,61	4,35	9,24	11,1	15,1	16,7	20,5
6	0,872	1,64	2,2	5,35	10,6	12,6	16,8	18,5	22,5
8	1,65	2,18	3,49	7,34	13,4	15,5	20,1	22	26,1
10	2,56	3,25	4,87	9,34	16	18,3	23,2	25,2	29,6
15	5,23	7,26	8,55	14,3	22,3	25	30,6	32,8	37,7
20	8,26	10,9	12,4	19,3	28,4	31,4	37,6	40	45,3
25	11,5	14,6	16,5	24,3	34,4	37,7	44,3	46,9	52,6
30	15	18,5	15,6	29,3	40,3	43,8	50,9	53,7	59,7

Значение коэффициента γ

v	γ	v	γ
1	0,71	25	18,75
2	1,41	26	19,59
3	2,12	27	20,44
4	2,83	28	21,29
5	3,54	29	22,16
6	4,25	30	23,04
7	4,97	31	23,93
8	5,69	32	24,84
9	6,41	33	25,75
10	7,14	34	26,68
11	7,87	35	27,61
12	8,61	36	28,57
13	9,35	37	29,53
14	10,09	38	30,5
15	10,84	39	31,49
16	11,6	40	32,5
17	12,36	41	35,31
18	13,13	42	34,54
19	13,91	43	35,59
20	14,7	44	36,64
21	15,49	45	37,72
22	16,29	46	38,8
23	17,1	47	39,91
24	17,92	48	41,02

Продолжение прил. 10

v	γ	v	γ
49	42,15	75	77,31
50	43,3	76	78,89
51	44,46	77	80,5
52	45,64	78	82,12
53	46,84	79	83,76
54	48,04	80	85,42
55	49,27	81	87,09
56	50,51	82	88,79
57	51,77	83	90,5
58	53,04	84	92,23
59	54,33	85	93,98
60	55,64	86	95,75
61	56,97	87	97,54
62	58,31	88	99,34
63	59,66	89	101,17
64	61,04	90	103,01
65	62,43	91	104,87
66	63,84	92	106,75
67	65,27	93	108,65
68	66,71	94	110,57
69	68,17	95	112,51
70	69,65	96	114,46
71	71,15	97	116,44
72	72,66	98	118,43
73	74,19	99	120,44
74	75,74	100	122,47

Продолжение прил. 10

V	γ	V	γ
101	124,53	114	152,93
102	126,6	115	155,25
103	128,68	116	157,59
104	130,79	117	159,95
105	132,92	118	162,33
106	135,07	119	164,72
107	137,23	120	167,14
108	139,42	121	169,58
109	141,62	122	172,03
110	143,84	123	174,51
111	145,09	124	177
112	148,35	125	179,52
113	150,63	126	—

Приложение 11

Коэффициенты затухания

φ_s	$H^*_b(\infty, t_0)$ при $M_0=10$				$H^*_b(\infty, t_0)$ при $M_0=20$			
	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120\ldots\infty$	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120\ldots\infty$
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0,01	0,9882	0,9903	0,9921	0,994	0,9872	0,9898	0,9918	0,9937
0,02	0,9764	0,9806	0,9842	0,988	0,9744	0,9796	0,9836	0,9874
0,03	0,9646	0,9709	0,9763	0,982	0,9616	0,9694	0,9754	0,9811
0,04	0,9528	0,9612	0,9684	0,976	0,9488	0,9592	0,9672	0,9748
0,05	0,941	0,9517	0,9605	0,9701	0,9359	0,9491	0,9589	0,9684
0,06	0,9301	0,9428	0,9532	0,9642	0,9247	0,9396	0,9511	0,9626
0,07	0,9192	0,9339	0,9459	0,9583	0,9125	0,9301	0,9433	0,9568
0,08	0,9082	0,925	0,9386	0,9524	0,9008	0,9206	0,9355	0,951
0,9	0,8974	0,9161	0,9313	0,9465	0,8891	0,9111	0,9277	0,9452
0,10	0,8863	0,9073	0,9242	0,9408	0,8776	0,9015	0 9201	0,9394
0,12	0,8664	0,8906	0,9105	0,93	0,8564	0,8841	0,906	0,9283

Продолжение прил. 11

φ_s	$H^*_\beta(\infty, t_0)$ при $M_0=40$				$H^*_\beta(\infty, t_0)$ при $M_0=60$			
	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120 \ldots \infty$	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120 \ldots \infty$
0,14	0,8465	0,8739	0,8968	0 9192	0,8352	0,8667	0,8919	0,9172
0,16	0,8266	0,8572	0,8831	0,9084	0,814	0,8493	0,8778	0,9061
0,18	0,8067	0,8405	0,8694	0,8978	0,7926	0,8318	0,8636	0,8951
0,21	0,7809	0,8187	0,8511	0,8833	0,765	0,8088	0,8445	0,8801
0,24	0,7551	0,7969	0,8328	0,8688	0,7374	0,7858	0,8254	0,8651
0,27	0,7293	0,7751	0,8145	0,8543	0,7098	0,7628	0,8063	0,8501
0,3	0,7035	0,7534	0,7962	0,8397	0,6821	0,74	0,7874	0,835
0,33	0,6815	0,7346	0,7795	0,8266	0,659	0,7203	0,7707	0,8216
0,36	0,6596	0,7158	0,7628	0,8135	0,6359	0,7006	0,754	0,8082
0,39	0,6375	0,697	0,7461	0,8004	0,6128	0,6809	0,7373	0,7948
0,42	0,6155	0,6782	0,7294	0,7874	0,5898	0,6612	0,7205	0,7813
0,45	0,5965	0,6614	0,716	0,7755	0,5698	0,6436	0,7048	0,7692
0,48	0,5775	0,6446	0,7026	0,7636	0,5498	0,626	0,6891	0,7571

0,51	0,5585	0,6279	0,6893	0,7517	0,5298	0,6083	0,6734	0,7449
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0,01	0,9863	0,9891	0,9914	0,9935	0,985	0,9884	0,991	0,9934
0,02	0,9726	0,9782	0,9828	0,987	0,97	0,9768	0,982	0,9868
0,03	0,9589	0,9673	0,9742	0,9805	0,955	0,9652	0,973	0,9802
0,04	0,9552	0,9564	0,9656	0,974	0,94	0,9536	0,964	0,9736
0,05	0,9314	0,9453	0,957	0,9676	0,9252	0,9422	0,9552	0,9669
0,06	0,918	0,9348	0,9484	0,9617	0,9115	0,9314	0,9466	0,9606
0,07	0,9046	0,9243	0,9398	0,9558	0,8978	0,9206	0,938	0,9543
0,08	0,8912	0,9138	0,9312	0,9449	0,8841	0,9098	0,9294	0,948
0,9	0,8778	0,9033	0,9226	0,944	0,8704	0,899	0,9208	0,9417
0,1	0,8646	0,893	0,9167	0,938	0,8567	0,8883	0,9121	0,9355
0,12	0,8424	0,8751	0,9019	0,9266	0,8322	0,8688	0,8967	0,924
0,14	0,8202	0,8572	0,8871	0,9152	0,8077	0,8493	0,8813	0,9125
0,16	0,798	0,8393	0,8723	0,9038	0,7832	0,8298	0,8659	0,901
0,18	0,7758	0,8213	0,8574	0,8922	0,7588	0,8103	0,8504	0,8895
0,21	0,7467	0,7971	0,8375	0,8768	0,7276	0,7849	0,8314	0,8739

Продолжение прил. 11

φ_s	$H^*_b(\infty, t_0)$ при $M_0=40$				$H^*_b(\infty, t_0)$ при $M_0=60$			
	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120\ldots\infty$	$t_0=7$	$t_0=28$	$t_0=60$	$t_0=120\ldots\infty$
0,24	0,7176	0,7729	0,8176	0,8614	0,6964	0,7595	0,8124	0,8583
0,27	0,6885	0,7487	0,7977	0,846	0,6652	0,7341	0,7934	0,8427
0,30	0,6593	0,7244	0,7777	0,8308	0,6342	0,7085	0,7745	0,8269
0,33	0,6349	0,7038	0,7604	0,8172	0,6084	0,6869	0,7547	0,8129
0,36	0,6105	0,6832	0,7431	0,8036	0,5826	0,6653	0,7349	0,7989
0,39	0,5861	0,6626	0,7258	0,79	0,5568	0,6437	0,7151	0,7849
0,42	0,5615	0,6419	0,7086	0,7766	0,5312	0,6219	0,6952	0,7708
0,45	0,5407	0,6239	0,6931	0,7643	0,5095	0,6031	0,6792	0,7582
0,48	0,5199	0,6059	0,6776	0,752	0,4878	0,5843	0,6632	0,7456
0,51	0,4992	0,5878	0,6621	0,7398	0,4662	0,5656	0,6474	0,733

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. **Общие положения** 4
2. **Требования к керамзитобетону на карбонатном песке** . . 5
3. **Методика определения деформаций усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке, а также потерь предварительного напряжения в арматуре** 7
4. **Использование математико-статистических методов при изучении усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке и потерь предварительного напряжения в арматуре** 19
5. **Оценка надежности и достоверности экспериментальных данных** 36
6. **Определение расчетных значений деформаций ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке** . . 40
7. **Расчет потерь предварительного напряжения в арматуре, вызванных ползучестью керамзитобетона на карбонатном песке** 47
8. **Расчет потерь предварительного напряжения в арматуре, вызванных усадкой керамзитобетона на карбонатном песке** 50

Приложение 1. Условные обозначения, принятые в настоящих Рекомендациях 51

Приложение 2. Рекомендуемые формы журналов изготовления, характеристик и результатов испытаний образцов 53

Приложение 3. Экспериментальное определение деформаций усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке 61

Приложение 4. Экспериментальное определение потерь предварительного напряжения в арматуре от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке 73

Приложение 5. Примеры расчетного определения потерь предварительного напряжения от ползучести и усадки керамзитобетона на карбонатном песке 86

Приложение 6. t-распределение 90

Приложение 7. F-распределение ($\alpha = 0{,}05$) 92

Приложение 8. σ-распределение ($\alpha = 0{,}05$) 94

Приложение 9. χ^2-распределение 95

Приложение 10. Значение коэффициента γ 96

Приложение 11. Коэффициенты затухания 99

Нормативно-производственное издание

НИЛЭП ОИСИ

РЕКОМЕНДАЦИИ

по учету потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести керамзитобетона на карбонатном песке

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией Л. Г. Бальян

Редактор И. А. Баринова

Мл. редакторы И. В. Баранова, Г. А. Полякова

Технический редактор Р. Я. Лаврентьева

Корректор Н.С. Сафронова

Подписано в печать 27.04.87 Т – 13420 Формат 84x108 1/32
Бумага офсетная №2 Печать офсетная Усл.печ.л. 5,46
Усл.кр.-отт. 5,67 Уч.-изд.л. 6,38 Тираж 3700 экз. Изд. № XII–1690
Заказ № 559 Цена 30 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Типография АгроНИИТЭПищепрома
113035, Москва, ул. Осипенко, 14

gost.e-ecolog.ru