

691.32:539.4

П84

Н. М. БЕЛЯЕВ, И. П. АЛЕКСАНДРИН,
Н. Г. КОРСАК и А. В. САТАЛКИН

**ПРОЧНОСТЬ,
УПРУГОСТЬ и ПОЛЗУЧЕСТЬ
БЕТОНА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА БССР

1941

СТРОЙИЗДАТ НАРКОМСТРОЯ

691

784

Н. М. БЕЛЯЕВ, И. П. АЛЕКСАНДРИН,
Н. Г. КОРСАК и А. В. САТАЛКИН

Д Е П.

691.32-539,4

П84

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССРПРОЧНОСТЬ, УПРУГОСТЬ
И ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНАПод руководством
д-ра техн. наук, проф.
Н. М. БЕЛЯЕВА

38532

мр 83

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

мр 96

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

мр 08

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1941 МОСКВА

ОПЕЧАТКИ

<i>Стр.</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>	<i>По чьей вине</i>
59	13 снизу	воздух	вода	Авт.
92	10 сверху	а усилия	на усилия	Тип.
94	9 снизу	не прибегать	прибегать	Авт.

Н. М. Б е л я е в и др. Прочность, упругость и ползучесть бетона. Зак. 6375.

В книге рассматриваются вопросы прочности, упругости и ползучести бетона. Как и выпущенный в 1939 г. сборник „Физико-механические свойства бетона“, настоящая книга содержит результаты исследований в области бетона, выполненных работниками механической лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта.

В отдельных статьях книги описаны экспериментальные исследования прочности бетона, а также его упругих свойств, сцепления с арматурой, сцепления бетонов, уложенных в разное время и т. п.

Заключительная статья содержит обзор современных теорий ползучести бетона.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников строительных, проектных и научно-исследовательских организаций.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит результаты дальнейших работ механической лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта в области изучения физико-механических свойств бетона.

Статьи, помещенные в сборнике, освещают еще мало разработанные, но весьма актуальные в настоящее время вопросы.

В статье Н. М. Беляева рассматриваются задачи повышения пластичности бетона и вопросы прочности этого материала. Сюда же относятся исследования сопротивления бетона ударному действию нагрузок (И. П. Александрин); в связи с развитием скоростного строительства приобретает особое значение вопрос о прочности и упругости бетона в раннем возрасте (Н. Г. Корсак); наконец, четвертая статья (А. В. Саталкин) рассматривает вопрос о ползучести бетона с точки зрения значения этого явления для инженера.

В настоящее время в механической лаборатории идут опыты по исследованию ползучести бетона при растяжении. Статья А. В. Саталкина является вводной, обобщающей частью этой работы.

Общая редакция сборника принадлежит проф. Н. М. Беляеву, заведующему механической лабораторией ЛИИЖТ. В опытах и обработке их результатов, послуживших основой предлагаемых статей, принимал участие весь персонал бетонного и цементного отделения механической лаборатории во главе с заведующим отделением инж. Я. Е. Йохельсоном.

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ БЕТОНА

Бетон принято считать хрупким материалом. Действительно, в условиях обычного испытания на сжатие или при действии ударной нагрузки бетон разрушается как типично хрупкий материал.

Наличие хрупкого или пластичного состояния какого-либо материала в настоящее время связывают со взаимным расположением диаграмм сопротивления материала отрыву и пластическим деформациям.

Если сопротивление пластическим деформациям затруднено, если кривая этого сопротивления в зависимости от роста деформации идет выше кривой сопротивления отрыву (рис. 1, а), материал находится в хрупком состоянии; если же расположение этих кривых является обратным, мы имеем дело с пластичным состоянием материала (рис. 1, б).

Однако это представление может быть видоизменено. Всякое «разрушение» материала, в действительном смысле слова, это отрыв, отделение одной части материала от другой, разъединение этих частей; таким образом отрыв связан, повидимому, не с растягивающими напряжениями, которых может и не быть при данном виде напряженного состояния, а с предельной величиной относительной деформации растяжения.

Например, при сжатии бетонного образца-призмы разрушение происходит путем образования продольных трещин, параллельных сжимающему усилию.

Как только относительное поперечное растяжение (при сжатии) достигает определенной величины, бетон терпит разрыв. Можно сказать, что образец бетона разрушается от сжатия, материал же образца — от растяжения.

Таким образом можно думать, что отрыв — окончательное разрушение материала — определяется, независимо от вида напряженного состояния, только наличием относительного растяжения определенной величины, зависящей от степени деформации.

Поэтому диаграмму сопротивления отрыву можно рассматривать как изображенную в ином масштабе диаграмму зависимости от степени пластической деформации тех упругих удлинений, после которых в материале происходит отрыв одной части от другой.

Точно так же диаграмму сопротивления пластическим деформациям можно рассматривать как диаграмму зависимости от степени деформации тех упругих удлинений, за которыми наступают пластические деформации (рис. 2).

Таким образом вопрос о прочности материала можно связывать не о величиной напряжений, а с величиной упругих относительных деформаций-удлинений.

Переход к такой точке зрения позволяет объяснять появление трещин — нарушение прочности и там, где нет никаких растягивающих напряжений, как в приведенном выше примере разрушения бетонной призмы.

Хрупкое и пластичное состояние материала будет связано с взаимным расположением кривых, аналогичных изображенным на рис. 1, с тем лишь отличием, что по вертикали отложены значения относительных упругих удлинений (рис. 3), а по горизонтали — относительное сужение образца. Рис. 3 относится к случаю деформации стального цилиндрического образца, но аналогичная картина, с иным лишь очертанием обеих кривых, будет иметь место и для других материалов при любом виде деформации. Как известно,

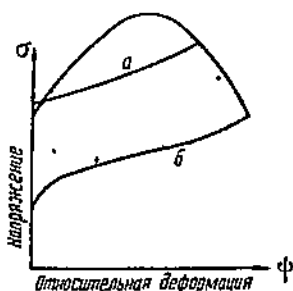


Рис. 1.

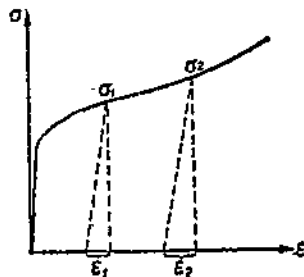


Рис. 2.

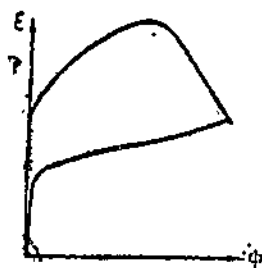


Рис. 3.

взаимное расположение кривых на рис. 3 зависит от ряда факторов, в частности от скорости деформации.

Обычно кривая «удлинений отрыва» мало реагирует на этот фактор, т. е. при разных скоростях деформации величина относительного упругого удлинения, за которой следует разрыв, остается примерно одной и той же.

Скорость деформации, наоборот, весьма значительно влияет на кривую «удлинений пластичности», вторую кривую диаграммы (рис. 3). Чем больше эта скорость, тем выше расположена рассматриваемая кривая, тем большее упругое удлинение терпит материал, не переходя в стадию пластичности.

Поэтому при больших скоростях деформирования вполне возможно достижение упругими удлинениями тех значений, за которыми следует разрыв; материал переходит в хрупкое состояние.

Для бетона уже малая скорость деформации вызывает подъем кривой «удлинений пластичности» выше кривой «удлинений отрыва»; поэтому и при статических испытаниях, не говоря уже о действии ударных нагрузок, бетон ведет себя как материал, находящийся в хрупком состоянии.

Однако имеется ряд опытных данных, указывающих на то, что нет оснований безоговорочно мириться с хрупкостью бетона.

Упругие деформации бетона уже при самых малых нагрузках сопровождаются пластическими настолько заметной величины, что

приходится говорить о модуле упругости, вернее о модуле деформации бетона по отношению как к упругим, так и к полным деформациям.

С другой стороны, хорошо известно, что бетон обладает способностью к «крипу» (ползучести) при обычной температуре, подобно тому как металлы — при высоких температурах.

Ползучесть бетона в ряде случаев может иметь своим следствием явление релаксации — падения напряжения в элементах конструкции при неизменной полной деформации.

Сюда относятся известные факты перераспределения напряжений в железобетонных колоннах, когда стальная арматура получает напряжения, доходящие почти до предела текучести, а бетон значительно разгружается; с подобным же явлением приходится считаться при попытках регулирования напряжений в бетонных статически неопределимых конструкциях (свод), когда искусственно вызванные начальные напряжения через сравнительно небольшой период времени почти полностью исчезают.

Таким образом оказывается, что бетон способен к значительным (сравнительно) пластическим деформациям, если они могут происходить очень медленно.

Здесь уместно будет сказать о том, при какой величине остаточных деформаций материала после разрушения можно считать его находящимся в пластичном состоянии.

Здесь вряд ли можно провести резкую и, главное, постоянную границу.

В различных случаях, как известно, мы требуем от материала различной степени пластичности, определяемой хотя бы величиной остаточных удлинений после разрыва.

Оказалось, что во многих случаях достаточно сравнительно небольшой степени пластичности, чтобы материал был гарантирован от появления трещин. Надо думать, что там, где речь идет лишь о местных напряжениях, уже 3—5% относительного удлинения могут оказаться достаточными.

Очень показательны успехи, которые в последние годы достигнуты в отношении расширения области применения такого хрупкого материала, как чугун. Путем специальных легирующих присадок удалось несколько поднять пластичность чугуна, и это открыло возможность его применения даже для таких деталей, как коленчатые валы некоторых типов двигателей внутреннего сгорания (тракторные двигатели).

Таким образом широко распространенная точка зрения, что пластичное состояние материала характеризуется удлинениями δ_{10} порядка 15—22%, должна быть пересмотрена. Даже сравнительно небольшое увеличение степени пластичности материала может дать значительный эффект.

В этом отношении бетон является чрезвычайно заманчивым материалом, позволяющим вести отливку деталей при обычных температурах.

Уже и сейчас, при наличных исходных материалах и методах изготовления бетонных и железобетонных конструкций, степень пластичности бетона оказывается достаточно высокой при условии,

что деформации бетона происходят весьма медленно. Бетон в этом случае прекрасно «приспосаблиется» к весьма неприятным внешним воздействиям.

Так, усадка бетона на воздухе, вызывающая сокращение объема бетона при свободной деформации, может при некоторых закреплениях элементов конструкции вызывать удлинения, близкие к удлинениям отрыва. Но при сравнительно медленном темпе этих усадочных деформаций бетон ведет себя как пластичный материал, у которого остаточные деформации успевают появиться при сравнительно низких упругих удлинениях. Это позволяет бетону релаксировать и тем самым избавиться от появления трещин.

Подобным же образом бетон «приспосаблиется» и к воздействиям, связанным с изменением температуры.

За счет возможности очень медленных деформаций при статической нагрузке происходит «рассасывание» местных напряжений во всякого рода углах и переходах в железобетонных конструкциях, что тоже является крайне благоприятным обстоятельством, которое учитывается нашими конструкторами скорее чутьем, чем сознательно.

К числу аналогичных же фактов, но скорее неприятных для нас, относятся упомянутые релаксационные явления при перераспределении напряжений в железобетоне и «рассасывание» начальных напряжений в статически неопределимых конструкциях.

Но мы не можем удовлетворяться существующим положением вещей относительно пластичности бетона.

Прежде всего в отношении борьбы с усадочными и температурными деформациями бетон является материалом все же слишком медленно переходящим в пластичное состояние.

В тех случаях, когда происходит бурный рост температур, что имеет зачастую место в больших массивах, скорость температурных деформаций оказывается слишком значительной и бетон дает трещины.

Поэтому, даже и в этом отношении существующая зависимость развития пластических деформаций от скорости деформирования не может нас удовлетворить.

Еще большее значение приобретает этот вопрос, когда речь идет о сопротивлении бетона ударным воздействиям. Задача состоит в том, чтобы добиться от этого материала пластических деформаций и при сравнительно высоких скоростях. Надо прежде всего дать себе отчет, какие обстоятельства могут этому способствовать.

Бетон как материал представляет собой сложную систему. Здесь мы имеем твердую фазу (камневидная составляющая + цементный клей) с порами, заполненными частью воздухом, частью водой, находящейся в особых условиях (возможность перемещения в капиллярных каналах).

Камневидная составляющая если и допускает пластические деформации, то в малой степени; цементный же клей в некоторых случаях может обладать такими свойствами, которые будут чрезвычайно благоприятными для развития пластических деформаций.

Что касается заполнителей пор, то, отбрасывая вопрос о влиянии воздуха, влияние воды, находящейся в порах бетона, никак нельзя игнорировать. На специфичность поведения воды в этом случае, в связи с явлениями поверхностного натяжения, особенно энергично указывал Фрейсинэ.¹ Надо думать, что присутствие жидкой фазы в узких порах бетона вызывает явления, характерные для вязких материалов.

Таким образом бетон следует рассматривать как упруго-пластично-вязкий материал.

В настоящее время мы располагаем уже достаточными возможностями, чтобы поставить вопрос о разработке аналитической теории для подобного рода материала. Развитие теории упругости, теории пластических деформаций, теории вязких жидкостей привело к тому, что уже ставятся вопросы о теории деформаций подобного рода систем и намечаются пути, которые, повидимому, приведут к решению поставленных задач.

Наличие вязкой фазы, вероятно, несколько осложнит рассмотренную выше схему взаимодействия кривых удлинений отрыва и пластической деформации; последняя будет более чувствительна к повышению скорости деформирования.

Вязкость жидкой фазы будет особенно резко влиять в неблагоприятную сторону при высоких скоростях (удар).

В печатаемой ниже статье И. П. Александрина приведены результаты опытов над сопротивлением бетона удару.

Оказалось, что бетон, имеющий значительную статическую прочность, с малым водоцементным отношением, не является наилучшим с точки зрения сопротивления ударным воздействиям. Здесь следует применять бетон с большим водоцементным отношением, имеющий более пластичную консистенцию при укладке.

В этом случае, повидимому, мы имеем более благоприятную конфигурацию пор, заполненных водой, конфигурацию, обеспечивающую меньшую вязкость жидкой фазы, а стало быть меньшую чувствительность кривой пластических удлинений к скорости деформации; ординаты этой кривой будут меньше возрастать при увеличении скорости и опасность хрупкого разрыва понизится.

С другой стороны, повышенное водоцементное отношение может создать студнеобразную структуру цементного клея, благоприятствующую развитию пластических деформаций в этой составляющей бетона.

В связи с этим необходимо поставить вопрос об изучении структуры составляющих затвердевшего цементного клея и об управлении развитием этой структуры в таком направлении, которое обеспечило бы наибольшие возможности пластического деформирования.

Подобного рода вопрос можно теперь уже поставить как проблему, имеющую шансы на разрешение.

Работы А. Е. Шейкина,² в настоящее время научного сотрудника механической лаборатории ЛИИЖТ, в значительной мере

¹ Е. Фрейсинэ, Переворот в технике бетона, 1938.

² А. Е. Шейкин, Прочность цементного камня, ЛИИЖТ, 1940.

разъяснили механизм твердения цементного клея и дали возможность поставить вопрос об управлении этим механизмом в той или иной степени, т. е. о получении цемента, дающего бетон с заранее заданными свойствами. При этих условиях и можно ставить задачу о получении в бетоне таких составляющих затвердевшего цементного клея, которые обладали бы структурой, наиболее благоприятствующей развитию пластических деформаций.

В настоящее время в механической лаборатории ЛИИЖТ ведется рентгенографическое изучение структуры составляющих цементного клея.

Высокая сопротивляемость этих составляющих пластическим деформациям связана с очень сложным строением получающихся при твердении бетона кристаллических образований. Эта структура гораздо более сложна, чем простая кристаллическая решетка мягкой стали, обладающей высокой способностью к пластическим деформациям.

Ведущееся изучение структуры составляющих цементного клея и возможность в той или иной степени влиять на эту структуру в желаемом направлении открывают путь к повышению пластичности бетона.

Наконец, надо обратить внимание и на камневидную составляющую бетона.

Для бетона, подвергающегося ударным нагрузкам, необходимо поставить вопрос о выборе камневидной, наиболее пригодной для увеличения пластичности бетона.

Для наиболее важных и ответственных случаев, мне кажется, не исключена возможность изготовления специального вида камневидной составляющей, обладающей свойствами, способствующими развитию пластических деформаций в бетоне.

Таким образом указанная выше задача повышения пластичности бетона в целях увеличения его сопротивления различным механическим воздействиям является не только крайне актуальной, но и имеет, как мне кажется, шансы на благоприятное разрешение.

Надо еще раз вспомнить о судьбе чугуна; этот материал, казалось, исчерпал все свои возможности; в последнее же время он завоевал новые области применения.

Так и в области бетона теория и технология этого материала, не нуждающегося, как чугун, в горячем процессе, еще далеко не сказали всего, чего мы вправе от них ожидать.

Доц. И. П. АЛЕКСАНДРИН

ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РОДА КАМЕННОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

1. Введение

Растущее из года в год применение цементного бетона в различных областях строительства требует громадных количеств каменных материалов, идущих в качестве заполнителя бетона.

В связи с тем, что в ряде случаев к каменному заполнителю бетона предъявляются высокие требования, до настоящего времени

нередко отказываются от использования на щебень для бетона таких горных пород, как известняки, песчаники и т. д., а иногда отказываются и от применения гравия. В этих случаях, как правило, отдается предпочтение щебню из изверженных горных пород даже тогда, когда это сопряжено с дополнительными затратами денежных средств и с перевозкой материалов на значительные расстояния. При этом обычно основываются на том, что технические требования к бетону данных сооружений не могут быть удовлетворены при применении иных видов заполнителя, главным образом вследствие недостаточной прочности и стойкости их или в силу недостаточного сцепления цементного камня с каменным скелетом бетона.

Нельзя не признать, что в тех случаях, когда к прочности бетона предъявляются особенно высокие требования, указанный взгляд является правильным, так как в этих случаях должны быть с наибольшей эффективностью использованы все средства, способствующие увеличению прочности бетона. Между тем, как правило, бетон, изготовленный со щебнем каменных материалов средней и пониженной прочности, оказывается менее прочным, нежели, например, бетон с гранитным щебнем. Тем не менее во многих случаях может представиться выгодным компенсировать недостаток в прочности бетона из «слабого» каменного материала некоторым увеличением расхода цемента, удлинением срока распалубки сооружения и пуска его в эксплуатацию и т. д.

Такое разрешение вопроса об использовании в бетоне слабых каменных материалов является тем более целесообразным, что распространение высокопрочных горных пород первичного происхождения в нашей стране относительно невелико. Весьма многие и обширные районы СССР вовсе не имеют природных запасов таких пород или имеют незначительные запасы их. Значительно шире распространены различного рода осадочные породы, среди которых по большей части встречаются породы средней и низкой прочности. В таких районах с точки зрения интересов народного хозяйства должно быть обязательным применение в бетоне местных каменных материалов, хотя бы и пониженной прочности, взамен более прочного привозного камня. Однако при этом необходимым условием должно явиться всестороннее изучение вопроса о влиянии рода каменного заполнителя на технические свойства бетона.

В силу большого разнообразия горных пород как в петрографическом, так и в структурном отношении едва ли представится возможным установить какие-либо надежные и закономерные связи между свойствами бетона и каменного заполнителя, входящего в его состав. Очевидно, что ранее должна быть разрешена трудная задача о количественной связи между составом и структурой горных пород и их механическими характеристиками. Поэтому при разрешении вопросов, связанных с применением в бетоне каменных материалов пониженной прочности, особое значение приобретают фактические данные о свойствах таких бетонов, установленные испытаниями, проведенными в той или иной лаборатории.

Следует отметить, что в исследовательских работах по бетону, выполненных в нашей стране за последнее десятилетие, рассматриваемому вопросу уделяли, на наш взгляд, недостаточное внимание. В частности, работы ЦНИИПС позволили разработать инструкцию по применению в бетоне щебня из камня невысокой прочности.¹ Однако ограничение использования такого щебня лишь для бетона марок 110 кг/см² и ниже (§ 215 Технических условий) оставляет открытым вопрос о допущении рассматриваемых материалов в бетонах средней и высокой прочности (марок 130—170 кг/см² и выше). Кроме того, указанная инструкция имеет в виду применение в бетоне щебня из камня с временным сопротивлением сжатию от 60 до 300 кг/см², исходя, очевидно, из предпосылки, что все более прочные каменные материалы могут использоваться на щебень для бетона на общих основаниях. Между тем испытания бетона со щебнем из каменных материалов средней прочности (с временным сопротивлением сжатию в 500—600 кг/см²) показывают, что зачастую и в этих случаях имеет место понижение прочности сравнительно с прочностью бетона на гранитном щебне.

Поэтому совершенно очевидно, что необходимо расширить круг сведений о качестве бетона в зависимости от рода каменных заполнителей и выявить условия использования в бетоне камня низкой и средней прочности.

В настоящей работе и приводятся данные о прочности бетона с несколькими видами каменного заполнителя по опытам, выполненным в механической лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ) главным образом в период 1931—33 гг. Опубликование указанных материалов на наш взгляд явилось тем более необходимым, что вопрос об использовании местных материалов в бетоне за последнее время стал особенно актуальным в связи с развитием скоростных методов строительства, а также в связи с намечающимся строительством дорог с бетонными покрытиями, требующими громадных количеств каменных материалов.

2. Описание опытов и характеристика материалов для бетона

В рассматриваемых ниже опытах механической лаборатории ЛИИЖТ в бетоне испытывались следующие каменные материалы: гранитный, известняковый и кирпичный щебни и гравий; характеристика этих материалов дана ниже. Основной задачей опытов явилось выявление влияния каменного заполнителя на прочность бетона. В соответствии с этим образцы бетона, изготовленные из одной и той же бетонной смеси, подвергались испытаниям на сжатие, растяжение, изгиб и удар. При изготовлении образцов бетонную смесь перемешивали вручную, а при укладке в формы (последней) распределяли и уплотняли штыкованием.

Для испытаний изготавливали образцы следующих форм и размеров:

¹ Технические условия и нормы проектирования и возведения железобетонных и бетонных конструкций и сооружений, приложение XVII, НКТП, 1934.

на сжатие — кубики размером $20 \times 20 \times 20$ см; на разрыв — восьмерки с поперечным сечением 10×10 см при длине испытуемой части в 30 см; на изгиб — балочки (неармированные) размером $8 \times 15 \times 80$ см при расчетной длине (расстояние между опорами) $l = 70$ см; на удар — плиты размером $40 \times 40 \times 10$ см.

Изготовленные образцы через 24 часа освобождали от боковых форм, а через 48 часов перемещали в хранилище, где они находились во влажных опилках до испытания. Все испытания производились через 28 дней после изготовления образцов. При испытании на сжатие давление на образец производилось в направлении, перпендикулярном направлению штыкования массы при изготовлении кубика (по боковой поверхности). При испытании на изгиб нагрузка (сосредоточенная) передавалась при помощи ножа прессы в среднем сечении балки. Направление нагрузки совпадало с направлением штыкования массы при укладке ее в формы. В качестве установки для испытания бетона ударом использовался простейший копер системы Мартенса. При этом применялась методика испытаний, разработанная автором и применявшаяся в более ранних исследованиях свойств дорожного бетона.¹

Подготовка для ударных испытаний и порядок производства их заключались в следующем. В деревянный ящик размерами в плане 100×100 см насыпали слой песка толщиной в 25 см. Песок тщательно утрамбовывали и поверхность его выравнивали. Испытуемую плиту укладывали на эту песчаную подушку посредине ящика. Горизонтальность поверхности образца выверялась по уровню. Вся эта подготовка производилась под копром, причем ящик располагался таким образом, чтобы подвешенная на копре гиря в самом нижнем положении касалась центра образца, уложенного в ящике. Центр поверхности образца заранее отмечался нанесением на ней диагоналей.

Копер Мартенса состоит из двух деревянных реек-направляющих, на одной из которых нанесены деления через 1 см. Между направляющими расположена деревянная планка, которую можно перемещать по высоте вдоль направляющих и закреплять при помощи зажимного винта в любом положении. Снизу планка снабжена крючком, к которому подвешивается грушеобразная гиря весом в 5 кг. Падение гири осуществляется нажимом на рычажок, с которым соединен крючок. Крючок, поворачиваясь вокруг горизонтальной оси, на которую он насажен, освобождает гирю и она свободно падает.

Испытание бетонных плит на описанной установке производилось следующим образом. После установки образца планку с подвешенной к ней гирей поднимали на такую высоту, чтобы низ гири находился в 10 см от поверхности плиты. Затем гирю сбрасывали на плиту. После этого производился следующий удар уже с высоты в 20 см; третий удар осуществлялся падением гири с высоты 30 см и т. д. Испытание прекращалось с появлением трещин на образце, что устанавливалось путем внешнего осмотра плиты после каждого удара.)

¹ И. П. Александрин, Исследования бетона для дорожных работ, Труды ЛИИПС, вып. 110, 1931.

Как видно из табл. 1, цемент II отличается более тонким помолом. В отношении механических свойств этот цемент может быть квалифицирован как цемент повышенного качества (сравнительно с цементом I) и быстротвердеющий. Следует отметить, что испытания цементов, результаты которых даны в табл. 1, были выполнены еще по методике ОСТ 5157.

Таблица 2

Род цемента	Число испытанных проб	Отношение — $\frac{\text{активность по ОСТ 3202}}{\text{активность по ОСТ 5157}}$					
		Через 7 дней			Через 28 дней		
		min	max	среднее	min	max	среднее
Портланд-цемент	21	1,27	1,52	1,38	1,21	1,53	1,40
Глиноземистый	2	1,41	1,48	1,45	1,31	1,52	1,42
Пуццолановые портланд-цементы	5	1,46	1,68	1,57	1,28	1,50	1,36

В связи с тем, что при применении действующей в настоящее время методики испытания цементов (ОСТ 3202) активность цемента оказывается численно более высокой (как это видно из табл. 2, где приведена сводка сравнительных испытаний цементов по методикам ОСТ 5157 и 3202),¹ следует считать, что активность цементов I и II по современной методике, примерно, равна:

$$\text{цемент I} - 237 \times 1,4 = 330 \text{ кг/см}^2;$$

$$\text{цемент II} - 286 \times 1,4 = 400 \text{ кг/см}^2.$$

Песок, применявшийся в бетоне, во всех случаях был один и тот же. Это — ленинградский морской песок, применяемый на большинстве ленинградских строек. Объемный вес сухого песка

Таблица 3

Характеристика материала ²	Род материала			
	Гранит	Гравий	Известняк (путиловская плита)	Кирпич
Объемный вес сухого материала г/см ³	2,75	2,69	2,51	1,79
Водопоглощение по весу в % . . .	1,23	0,21	2,40	13,5
Временное сопротивление сжатию в кг/см ² $\sigma_{\text{сух}}$	1770	1580	648	420
$\sigma_{\text{нас}}$	1443	1347	458	329
Отношение $\sigma_{\text{нас}} : \sigma_{\text{сух}}$	0,82	0,85	0,71	0,81

¹ По данным механической лаборатории ЛИИЖТ.

² Все испытания производились над образцами размерами $4 \times 4 \times 4$ см; испытывали по 3 образца из каждой серии.

при рыхлой насыпке, принимавшийся в расчет, составлял 1 650 г/л, а модуль крупности равнялся 2,8.

В качестве камневидной добавки, как уже указывалось выше, применяли гранитный, известняковый, кирпичный щебни и гравий. Характеристика каменных материалов, примененных для изготовления крупного заполнителя, приведена в табл. 3.

В связи с высоким значением водопоглощения для известняка, и особенно кирпича, было признано целесообразным насыщать водой щебень из этих материалов до применения в бетоне и лишь незадолго до употребления подвергать некоторому высушиванию поверхности щебенки. В связи с этим щебень за 1—2 часа до применения в дело погружался в ванну с водой, а затем за 10—15 минут до употребления выгружался на решетку, на которой он и проветривался. Чтобы выяснить, достаточен ли указанный срок для подготовки известняко-

Таблица 4

Время, прошедшее от момента погружения щебня в воду	Вес пробы в г	
	Известняковый щебень	Кирпичный щебень
До погружения . . .	2000	2000
10 мин.	2077	2262
20 мин.	2082	2265
30 мин.	2082	2265
1 час.	2083	2266
2 часа	2084	2270
24 часа	2092	2281

вого и кирпичного щебня, предварительным опытом была установлена скорость насыщения их водою. В табл. 4 приведены результаты указанного опыта. Эти данные, а также наблюдения за внешним состоянием щебня перед употреблением показали, что принятый способ подготовки известнякового и кирпичного щебня является удовлетворительным. Можно полагать, что при таком состоянии их искажение водоцементного отношения в бетоне, за счет поглощения воды заполнителем, будет ничтожным и, следовательно, в дальнейшем при рассмотрении свойств бетона оно может не учитываться.

После ручной бойки каменных материалов на щебень (исключая гравий) последний рассеивался на грохотах с ячейками размером 5, 10, 20 и 40 мм. В дело применяли фракции 40—20 мм и 20—10 мм в соотношении:

- щебень (гравий) крупностью от 40 до 20 мм — 67%;
- щебень (гравий) крупностью от 20 до 10 мм — 33%.

Такая смесь соответствует модулю крупности 7,67.

Объемные веса щебня и гравия (смеси указанных фракций), принимавшиеся в расчет (известняковый и кирпичный щебень в рабочем, насыщенном состоянии), и соответствовавшие рыхлой насыпке их, были следующие:

Гранитный щебень	1361 г/л
Гравий	1340 "
Известняковый щебень	1244 "
Кирпичный щебень	936 "

Таблица 5

Каменный заполнитель бетона	Номинальный состав по объему	В/Ц по весу	Осадка конуса в см	Цемент I				Цемент II			
				Временное сопротивление в кг/см ²			Полная работа удара в кг/см	Временное сопротивление в кг/см ²			Полная работа удара в кг/см
				сжатие	разрыв	изгиб		сжатие	разрыв	изгиб	
Гравитный щебень	1:1,6:2,4	0,46	4,5	295	14,7	29,7	8283	364	14,2	40,4	4550
	1:1,6:2,4	0,60	19,5	189	11,4	30,2	5750	258	12,9	34,0	4225
	1:2,7:3,3	0,60	1,5	181	13,7	23,1	6000	252	12,7	25,2	3025
	1:2,7:3,3	0,67	4,0	122	10,4	24,9	4225	224	11,7	26,3	4225
	1:4,0:4,0	0,80	1,5	75	6,7	16,3	3117	125	6,0	20,0	1800
	1:4,0:4,0	0,94	5,0	73	3,0	12,8	3700	144	7,7	14,8	1950
Гравий	1:1,6:2,4	0,46	6,0	303	12,1	29,4	7650	316	14,7	31,0	2750
	1:1,6:2,4	0,60	22,0	168	10,1	29,2	5050	205	10,3	24,5	3300
	1:2,7:3,3	0,60	4,0	163	—	17,5	2933	189	10,1	26,3	1950
	1:2,7:3,3	0,65	8,5	147	8,5	14,9	2933	156	7,3	23,1	3025
	1:4,0:4,0	0,80	4,0	79	5,6	7,2	2583	104	7,1	14,2	1600
	1:4,0:4,0	0,89	8,5	74	2,9	8,0	2500	95	6,7	12,8	1600
Кирпичный щебень	1:1,6:2,4	0,40	1,5	258	10,0	29,7	3900	245	15,2	39,3	4900
	1:1,6:2,4	0,60	21,0	137	9,9	31,2	3025	147	11,8	28,6	2025
	1:2,7:3,3	0,60	3,5	152	7,4	16,7	3025	159	11,0	29,9	4550
	1:2,7:3,3	0,75	15,0	83	5,9	23,0	2750	112	10,8	18,5	3025
	1:4,0:4,0	0,80	2,0	72	3,3	10,7	2500	96	8,2	11,9	1400
	1:4,0:4,0	0,85	2,5	68	2,7	13,5	3300	91	6,2	12,4	2270
Известняковый щебень	1:1,6:2,4	0,46	4,5	215	12,3	28,8	4570	208	13,1	28,5	4900
	1:1,6:2,4	0,60	21,0	159	9,0	30,1	3900	158	10,6	23,5	3117
	1:2,7:3,3	0,60	2,0	178	8,0	14,9	3600	169	11,6	19,9	2025
	1:2,7:3,3	0,65	7,0	124	4,1	18,9	2750	117	5,9	19,5	2500
	1:4,0:4,0	0,80	1,0	69	4,0	6,1	1950	104	5,9	6,3	1667
	1:4,0:4,0	0,87	4,0	76	2,3	14,7	2025	74	6,6	8,3	2583

3. Результаты опытов, их анализ

В табл. 5 приводятся результаты всех механических испытаний бетона с различными каменными материалами. Рассматривая эти результаты, можно видеть, что во всех случаях прочность бетона понижается с увеличением водоцементного отношения. Исключением является сопротивление бетона удару, в отношении которого этот закон в ряде случаев нарушается. Объяснения этому явлению даны ниже. Закономерность влияния водоцементного отношения на характеристики прочности бетона позволила построить для всех изучавшихся бетонов кривые $R = f(B/C)$, представленные на рис. 1, 2 и 3 и использованные в дальнейшем анализе результатов опытов.

а) Соотношение различных характеристик прочности бетона

При оценке качества бетона основной характеристикой прочности обычно принято считать величину временного сопротивления сжатию. Сопротивление бетона иному действию нагрузок принято при этом оценивать как некоторую долю величины временного сопротивления сжатию.

Так, по опытам Тетмайера¹ временное сопротивление бетона растяжению в 28-дневном возрасте и при твердении во влажной среде составляет от 5 до 10 % величины временного сопротивления сжатию. Сопротивление бетона изгибу по дан. Мерша соответственно составляет 8—10 % величины временного сопротивления сжатию.¹

В связи с указанным представляется интерес выяснение влияния на эти отношения качества крупного заполнителя бетона. Пользуясь графиками зависимости $R = f(B/C)$, представленными на рис. 1, 2 и 3, мы вычислили эти отношения и сводка их приведена в табл. 6.

Из этой таблицы можно видеть, что рассматриваемые коэффициенты прочности для всех бетонов примерно одинаковы и лежат (по средним значениям) в пределах: для временного сопротивления разрыву от 4,8 до 6,8%, а для временного сопротивления изгибу от

10,8 до 14,4%, что хорошо согласуется с данными Тетмайера и Мерша, подтверждая их.

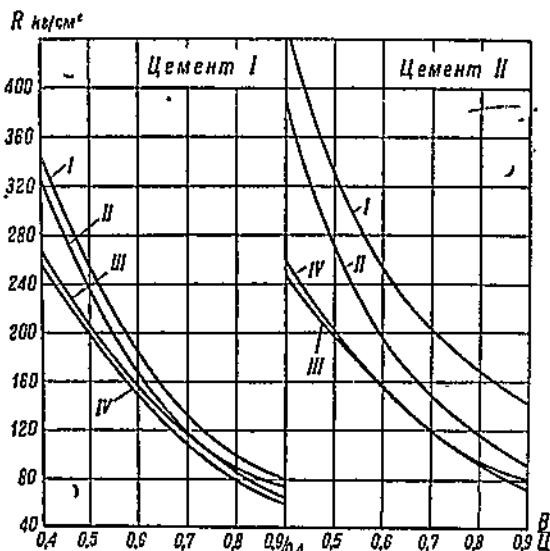


Рис. 1.

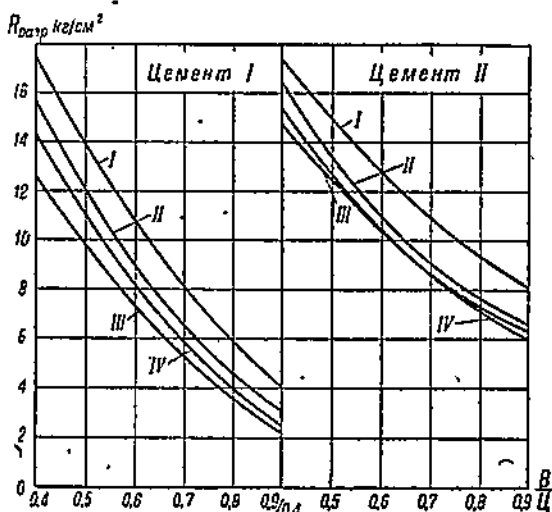


Рис. 2.

38532

Вместе с тем очевидно, что специфические особенности различных видов крупного заполнителя явно не отражаются на величине рассматриваемого коэффициента. Это позволяет считать, что влияние вида каменного материала на соотношение различных характеристик прочности практически может игнорироваться, тем более

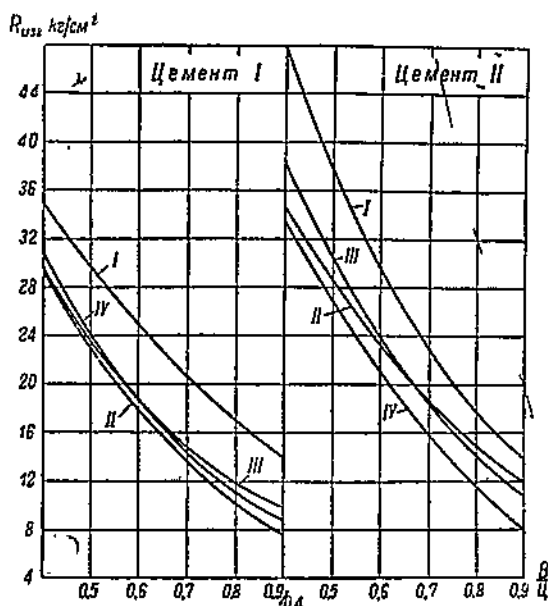


Рис. 3.

330 кг/см²), показал следующие величины временного сопротивления сжатию при применении:

Гранитного щебня	181 кг/см ²
Гравия	163 "
Известнякового щебня	178 "
Кирпичного щебня	152 "

Для выявления средней величины влияния каменного заполнителя на прочность бетона нами вычислены характеристики прочности бетонов в процентах от соответствующих характеристик бетона с гранитным щебнем (принятых за 100%). При этом расчеты производились при различных водоцементных отношениях от $B/C = 0,45$ до $B/C = 0,90$, после чего вычислялось среднее значение характеристики. Расчеты производились по ординатам кривых $R = f(B/C)$, представленных выше, с тем, чтобы исключить влияния случайных факторов. Однако, как показала проверка, средние значения относительных характеристик прочности, установленные путем обработки кривых $R = f(B/C)$, существенно не отличаются от средних значений, вычисляемых по фактическим данным табл. 5.

Сводка указанных относительных характеристик прочности бетона приведена в табл. 7.

В/Ц по весу	Сопротивление бетона разрыву и изгибу в процентах от временного сопротивления сжатию							
	Гранитный щебень		Известняковый щебень		Кирпичный щебень		Гравий	
	разрыв	изгиб	разрыв	изгиб	разрыв	изгиб	разрыв	изгиб
Цемент I. Активность 330 кг/см ²								
0,45	5,2	10,6	5,3	12,1	4,8	11,9	4,7	9,0
0,50	5,5	12,0	5,4	12,0	5,0	12,4	5,3	10,2
0,60	6,0	13,7	5,3	12,0	5,2	13,3	5,9	11,3
0,70	6,2	15,5	5,0	12,2	5,1	14,5	5,8	12,5
0,80	5,9	17,0	4,3	12,7	4,7	15,6	5,0	11,1
0,90	5,0	17,5	3,5	13,8	3,9	17,3	4,0	10,8
В среднем . .	5,6	14,4	4,8	12,5	4,8	14,2	5,1	10,8

Цемент II. Активность 400 кг/см ²								
0,45	4,2	11,0	6,1	13,6	6,4	15,5	4,6	9,6
0,50	4,5	11,4	6,4	13,7	6,6	15,7	4,9	10,6
0,60	5,1	11,9	6,8	13,3	6,7	15,5	5,6	12,3
0,70	5,4	12,6	7,3	13,2	6,9	15,3	6,1	13,6
0,80	5,6	10,8	7,7	12,12	7,2	14,4	6,6	13,8
0,90	5,7	10,0	6,5	8,4	7,2	13,3	7,3	13,6
В среднем . .	5,1	11,3	6,8	12,4	6,8	14,0	5,8	12,2

Как видно из табл. 7, потеря прочности бетона при замене гранитного щебня другими видами изучавшихся заполнителей составила для двух исследованных цементов:

По сжатию	от 11 до 400/0
„ разрыву	от 15 до 350/0
„ изгибу	от 18 до 320/0
„ удару	от 22 до 400/0

Таблица 7

Каменный заполнитель бетона	Прочность бетона в процентах от прочности бетона с гранитным щебнем (средние значения)							
	Цемент I				Цемент II			
	сжатие	разрыв	изгиб	удар	сжатие	разрыв	изгиб	удар
Гравий	89	81	68	62	75	85	80	63
Известняковый щебень	83	71	74	60	61	67	82	78
Кирпичный щебень	76	65	76	68	60	79	81	78

Особенно значительно качество каменного заполнителя отразилось на сопротивлении удару, для которого минимальное (из

средних) понижение прочности составило 22% от соответствующей характеристики бетона с гранитным щебнем.

Данные табл. 7 не позволяют установить каких-либо закономерных связей между характеристиками каменного заполнителя и бетона, но позволяют видеть, что при применении цементах различных марок влияние каменного заполнителя является различным. Точнее сказать, прочность бетона зависит от совокупности влияний специфических особенностей заполнителя и цемента. Это лишний раз подтверждает трудность обобщенного, но практически точного определения размеров влияния качества одного из компонентов бетона и указывает на безусловную необходимость в каждом частном случае прибегать к непосредственному опыту с применением в нем материалов, могущих представить интерес для данного конкретного строительства.

в) Влияние качества цемента на прочность бетона

Вопрос о влиянии качества цемента на прочность бетона нами в свое время был подробно изучен на основе больших экспериментальных исследований, выполненных в механической лаборатории ЛИИЖТ.¹ Здесь мы затронем этот вопрос лишь в связи с тем, что при изучении влияния на бетон каменного заполнителя выявились некоторые новые данные о взаимоотношении характеристик цемента и приготовленного из него бетона.

Прежде всего напомним, что в настоящих опытах бетоны испытывались с цементами активностью $R_a = 330$ и 400 кг/см^2 .

Соотношение активностей цементах (по 28-дневным испытаниям), следовательно, равно:

$$400 : 330 = 1,22.$$

При этом цемент II (активность 400 кг/см^2), как это отмечалось и выше, сравнительно с цементом I (активность 330 кг/см^2), является быстротвердеющим, что видно из сопоставлений соотношений их сопротивлений сжатию в четырех- и семидневном возрасте в растворе 1 : 3. Соотношения эти, вычисленные по данным табл. 1, соответственно равны:

$$\text{для четырехдневного возраста } 201 : 88 = 2,28;$$

$$\text{„ семидневного „ } 232 : 147 = 1,58.$$

Эти коэффициенты со всей очевидностью указывают, что быстрое нарастание прочности цемента II в дальнейшем сменяется более медленным процессом роста прочности, в результате чего цемент I к 28-дневному возрасту по своей активности значительно сблизился с цементом II. Нет никаких сомнений, что это различие в свойствах цементов нашло свое отражение и в свойствах изготовленных из них бетонов.

Переходя к бетонам, сопоставим величины их характеристик прочности при применении различных цементов. В табл. 8 при-

¹ И. П. Александрин, Механические характеристики бетона и связь их с качеством цемента, изд. Ленинградского института сооружений, 1932.

водятся отношения характеристик прочности бетона с цементом II к соответствующим характеристикам бетона, изготовленного с цементом I. При этом в таблице даны средние результаты вычислений, выполненных для бетона с разными значениями водоцементного отношения и лишь для бетона с гранитным щебнем. Как показал подробный анализ, результаты подобных сравнений для бетонов с остальными каменными материалами аналогичны данным табл. 8, и поэтому они здесь не приведены.

Как и можно было ожидать, замена цемента марки 300 цементом марки 400 вызвала различное изменение в характеристиках прочности. Наиболее

Таблица 8

Исходные данные	Отношение прочности бетона с цементом II к прочности бетона с цементом I в процентах (средние значения)			
	сжатие	разрыв	изгиб	удар
По фактическим данным (табл. 5)	156	127	117	65
По ординатам кривых	148	123	117	70

значительно увеличилось временное сопротивление сжатию, причем несколько больше, нежели этого можно было ожидать по соотношению активностей цемента в 28-дневном возрасте. Объяснение этого явления, нам представляется, надлежит искать в следующем. Выше уже говорилось, что исследовавшиеся цементы характеризуются различными кривыми твердения. При этом отмечалось, что отношение прочностей стандартного раствора из этих цемента с течением времени уменьшалось, достигнув к 28-дневному возрасту величины 1,22. Совершенно очевидно, что условия гидратации цемента в бетоне являются иными, нежели в стандартном растворе. Можно предполагать, что это различие в разной степени отражается на ходе процесса твердения бетонов из цемента различных типов, а это неизбежно влечет за собою нарушение закона пропорциональности между активностью цемента и прочностью бетона.

Отсюда вытекает частный характер закона пропорциональности, что и объясняет нередкие случаи нарушения его при практическом применении. Дальнейшее исследование этого вопроса, как нам представляется, должно учитывать специфические особенности сравниваемых цемента и установить разграничительные признаки их, которые позволили бы предвидеть возможность применения закона пропорциональности в каждом конкретном случае, а также возможные отклонения от этого закона при сравнении цемента неодинакового типа.

Возвращаясь к табл. 8, можно, далее, видеть, что замена цемента марки 300 цементом более высокого качества (марки 400) вызвала изменение в сопротивлении бетона изгибу и разрыву в меньшей степени, нежели в сопротивлении бетона сжатию. Этот результат находится в соответствии с данными испытаний цемента на растяжение в стандартных растворах. Действительно, если сопоставить временное сопротивление растворов на разрыв, то можно видеть,

что по данным табл. 1, это отношение для испытаний цементов в 28-дневном возрасте равно $64,2 : 57,1 = 1,12$, против отношения, равного 1,22, полученного при сравнении величин временного сопротивления сжатию того же раствора. Совершенно очевидно, что это различие сказалось и на сопротивлении бетона разрыву и изгибу. Отсюда вытекает условие для оценки влияния качества цемента в тех случаях, когда прочность конструкции определяется сопротивлением бетона изгибу или разрыву. Это условие заключается в том, что главнейшее внимание должно уделяться не активности цемента, оцениваемой по сопротивлению раствора сжатию, а временному сопротивлению раствора разрыву. Следовательно, при замене одного цемента другим эффект, вызываемый этой заменой, должен прежде всего оцениваться путем сравнения результатов стандартных испытаний цементов на разрыв. Следует отметить, что, несмотря на очевидность указанного положения, в практике строительства, а зачастую и в исследовательских работах, оно, как правило, игнорируется; в результате делают ошибочные выводы об эквивалентности или преимуществе одного цемента перед другим.

Последний и чрезвычайно интересный вывод, который можно сделать, изучая данные табл. 8, относится к сопротивлению бетона действию ударных нагрузок. Следует отметить, что вопрос об «ударной прочности» бетона разработан в наименьшей степени. В тех случаях, когда это свойство бетона приобретает важное значение, обычно считают, что для достижения высокого сопротивления бетона удару следует стремиться к изготовлению бетона, обладающего возможно более высоким сопротивлением сжатию. В связи с этим используются все средства, приводящие к указанной цели и, в частности, цементы наиболее высоких марок.

Такому взгляду способствовали отчасти и те немногочисленные исследования сопротивления бетона удару, которые были выполнены различными исследователями до настоящего времени. Объяснение этого обстоятельства кроется, очевидно, в недостаточной разработке методики исследований и, главным образом, в недостаточном объеме исследований и накопившихся фактов. Действительно, к выводу об увеличении «ударной прочности» бетона по мере возрастания «статической прочности» можно прийти, хотя, как теперь выяснилось, и с известными ограничениями, при изучении бетона с применением одних и тех же материалов и в частности одного и того же цемента.

К такому выводу пришли и мы, когда в механической лаборатории ЛИИЖТ нами были поставлены впервые опыты по испытанию бетона ударной нагрузкой.¹ Однако дальнейшие исследования показали, что в полученные ранее выводы должны быть внесены существенные коррективы. Действительно, рассматривая данные табл. 8, можно видеть, что замена в бетоне цемента марки 300 цементом марки 400, вместо ожидавшегося увеличения сопротивления удару, вызвала резкое понижение этого качества бетона. Из

¹ И. П. Александрин, Исследования бетона для дорожных работ, Труды ЛИИПС, вып. 110, 1931.

табл. 8 видно, что при применении в бетоне гранитного щебня указанное снижение сопротивления удару достигло 30%. Аналогичное понижение ударной прочности при применении цемента более высокого качества наблюдалось и при других каменных заполнителях бетона (табл. 5). Необходимо отметить, что в литературе можно найти некоторые указания на возможность ухудшения качеств бетона в смысле понижения сопротивления динамическим нагрузкам при применении высокосортных цемента. Так, например, такое предположение было высказано Дютроном (Бельгия) на основе небольшого числа выполненных им опытов. На VII Международном дорожном конгрессе (Мюнхен, 1934) отмечалась повышенная хрупкость глиноземистого цемента. В опытах, выполненных Гутманом и Венцелем (Германия), также два из испытанных шести цементов показали сопротивление удару меньшее, нежели этого можно было ожидать по их временному сопротивлению сжатию. Однако последние исследователи, оспаривая мнение Дютрона о повышенной хрупкости высокосортных цементов, считают, что низкие характеристики ударной прочности высокосортных цементов, полученные как в их опытах, так и в опытах Дютрона, объясняются несовершенством метода исследования. Нам представляется, что такое объяснение полученных экспериментальных данных не может быть признано удовлетворительным. Повидимому, повышенная хрупкость некоторых цементов должна объясняться их составом и структурой цементного камня, характерной для данного цемента.

В связи с этим особый интерес приобретает новая теория цементов, разработанная в СССР инж. А. Е. Шейкиным.¹ В соответствии с этой теорией структура отвердевшего цемента находится в зависимости от минералогического состава клинкера. Для некоторых портланд-цементов структура отвердевшего цементного камня является преимущественно коллоидной и они составляют один тип портланд-цементов, для других же цементов характерной является структура преимущественно кристаллическая (субмикроструктурная или макроструктурная). Как в той, так и в другой категории цементов возможны цементы большей или меньшей «статической прочности».

Если принять в основу теорию А. Е. Шейкина, то, очевидно, можно удовлетворительно объяснить повышенную хрупкость некоторых цементов, а также и имеющиеся по этому поводу разногласия. Действительно, при сравнении между собой цементов различной «статической прочности», но одинаковой структуры в отвердевшем состоянии, повидимому, должно наблюдаться полное соответствие между характеристиками ударной и статической прочности. В том же случае, когда сопоставляются цементы различных структур, неизбежно несоответствие между указанными характеристиками цемента.

В настоящей работе этот вопрос не мог быть освещен в надлежащей степени в связи с тем, что указанный взгляд на роль структуры цементного камня в формировании его прочности возник лишь в последнее время и по окончании описываемых экспе-

¹ А. Е. Шейкин, Прочность цементного камня, ЛИИЖТ, 1940.

риментальных работ. Однако, учитывая важность затронутого вопроса, в настоящее время лабораторией поставлена экспериментальная проверка высказанной гипотезы, что позволит в дальнейшем вернуться к ней уже на основе соответствующих опытных данных.

а) Сопротивление удару в зависимости от консистенции бетона

Второе обстоятельство, которое может быть подмечено при изучении данных о сопротивлении бетона удару (табл. 5), относится к нарушениям закона водоцементного отношения.

Действительно, рассматривая данные табл. 5, можно видеть, что в большинстве случаев, охваченных в наших опытах, сопротивление удару повышалось при увеличении водоцементного отношения. Однако при этом следует отметить, что каждый из испытанных составов бетона изучался лишь при двух значениях водоцементного отношения. Единственное объяснение указанного явления следует, повидимому, искать в особом значении, которое, с точки зрения ударной прочности, приобретает пластичность бетонной смеси.

Общеизвестно, что сопротивление бетона сжатию подчиняется закону Абрамса лишь при условии, что консистенция бетона при изменении V/C меняется в пределах от малопластичной до литой, причем во всех случаях бетонная смесь должна быть в достаточной мере удобообрабатываемой. При уменьшении водоцементного отношения до такого уровня, когда бетонная смесь становится чрезмерно жесткой (оухой), наблюдается понижение прочности, а не повышение ее, как это должно было бы вытекать из закона водоцементного отношения. Таким образом закон водоцементного отношения справедлив лишь в определенных границах изменения V/C . При этом заметим, что эти границы зависят также и от способа уплотнения бетона.

Причинами ограничения действия закона Абрамса со стороны низких значений водоцементного отношения являются следующие: с одной стороны, понижение прочности при чрезмерном уменьшении V/C может быть объяснено недостатком воды в бетоне, что приводит к ухудшению условий гидратации цемента; с другой стороны, при снижении V/C ниже известного уровня бетонная смесь получается настолько жесткой, что для достижения наилучшей прочности ее в отвердевшем состоянии необходимо усиленное уплотнение при укладке. Способ уплотнения, дающий хорошие результаты для пластичных бетонных смесей, в этом случае является уже недостаточным. Следует все же отметить, что при чрезмерно низких значениях V/C и усиленное уплотнение бетона не может устранить влияние, вызываемое недостатком воды, необходимой для возможно полной гидратации цемента; следовательно, даже при усиленном уплотнении прочность бетона будет пониженной.

Возвращаясь к сопротивлению бетона ударным нагрузкам, на основании данных табл. 5 можно высказать предположение о том, что наивысшая ударная прочность бетона данного состава достигается не при малопластичной и почти жесткой консистенции, как

это имеет место в отношении сопротивления сжатию, а при большей пластичности бетонной смеси при укладке. Этот вывод подтверждается также результатами испытаний, произведенных в лаборатории Ленинградского филиала Дорожного научно-исследовательского института (ДОРНИИ) В. А. Шильниковым при участии автора, а также результатами опытов Гутмана (Германия). Данные опытов Гутмана приведены в табл. 9.

Таблица 9

Опыты Гутмана. Состав бетона 1:3:3 по весу, возраст — 28 дней

Консистенция бетона	V/C по весу	Сопротивление удару кгм	Соотношение сопротивлений удару	Временное сопротивление сжатию в кг/см ²	Соотношение сопротивлений сжатию
Трамбованный . .	0,4	807	100	431	100
Пластичный . . .	0,6	1294	160	300	70
Литой	0,8	600	74	197	46

Данные табл. 9 указывают на то, что для структуры отвердевшего бетона жесткой консистенции характерным свойством является повышенная хрупкость.

В связи с этим, при необходимости иметь бетон с наибольшим сопротивлением удару, следует назначать консистенцию бетонной массы при изготовлении, соответствующей, примерно, осадке конуса 2—5 см, а в наиболее ответственных случаях устанавливать ее исходя непосредственно из специальных опытных данных.

д) Консистенция бетона. Расход цемента на кубический метр бетона

При сравнении механических характеристик бетонов, изготовленных с различными каменными заполнителями, мы всегда имели в виду, что сравниваемые бетоны характеризуются одинаковым водоцементным отношением. Таким образом исключалось влияние водоцементного отношения, что и позволяло судить о влиянии на прочность бетона лишь каменного заполнителя. Между тем, с производственной точки зрения, не менее ценным является сравнение качеств бетона при одинаковой степени пластичности. В связи с этим остановимся несколько на влиянии рода каменного заполнителя на консистенцию бетона.

Результаты настоящих опытов позволили прийти к выводу, что при одинаковом гранулометрическом составе каменного заполнителя пластичность бетонной смеси при применении щебня гранитного, известнякового или кирпичного, при прочих равных условиях, получается практически одинаковой, если только иметь в виду применение известнякового и кирпичного щебня в насыщенном водою состоянии, как это было указано выше.

Таким образом для этой категории материалов все выводы о прочности бетона, при условии одинаковой консистенции бетонной смеси при ее изготовлении, совпадают с полученными выше выводами о влиянии на прочность бетона каменных заполнителей, при одинаковом значении водоцементного отношения.

Таблица 10

Каменный заполнитель бетона	Расход цемента кг/м ³ бетона при номиналь- ном составе		
	1:4	1:6	1:8
Гранитный, известня- ковый и кирпич- ный щебень	400	285	215
Гравий	375	270	205

Несколько иначе получается с гравийным бетоном. В этом случае при равных водоцементных отношениях наблюдается большая пластичность гравийного бетона, нежели бетона с гранитным щебнем. Уравнивание степени пластичности этих двух видов бетона, как это было показано специальным исследованием, выполненным в механической лаборатории

ЛИИЖТ,¹ приводит к эквивалентности гравия и гранитного щебня в отношении расхода цемента при условии одинаковой прочности (марки) бетона. Имея в виду указанные исследования, здесь мы лишь отметим, что характерным для исследовавшегося гравия является также повышенный выход бетона, что можно видеть из табл. 10, где приведены данные о расходе цемента, полученные в настоящих опытах.

Инж. Н. Г. КОРСАК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И УПРУГИХ СВОЙСТВ БЕТОНА

1. Введение

Свойства затвердевшего бетона наиболее полно изучены применительно к месячному возрасту его. Значительно меньшее число исследований относится к бетону в другом возрасте — как в более раннем, так и в более позднем. Однако в строительной практике часто возникает необходимость оценить влияние времени на свойства бетона. В связи с этим делались неоднократные попытки на основе опытных данных выработать известные отношения или формулы, позволяющие по результатам испытаний бетона в каком-либо возрасте предопределить его свойства, в частности механическую прочность, в другом возрасте.

Следует отметить, что такой метод решения вопроса является, как показывает практика, не всегда удовлетворительным даже при оценке свойств бетона в позднем возрасте (2—3 месяца и более) и вовсе неудовлетворительным в том случае, когда необходимо

¹ И. М. Пушкин, Сравнение расходов цемента в бетоне с гравием и щебнем, Институт бетонов, 1932.

предугадать свойства бетона в самом раннем возрасте. Повидимому, основной причиной этого является недостаточность фактических данных, послуживших основой рекомендуемых отношений и формул.

Между тем вопрос о механической прочности бетона в раннем возрасте в последнее время приобретает особый интерес в связи с развитием скоростных методов строительства. Применение последних выдвигает ряд новых предложений по ускорению возведения сооружений, причем реализация некоторых из них возможна лишь при отчетливом знании свойств бетона в раннем возрасте его.

С другой стороны, реконструкция сооружений, уже эксплуатировавшихся некоторое время, требует знания свойств бетона после нескольких лет твердения.

В опубликованной ранее работе о влиянии времени на механические свойства бетона¹ затронутый вопрос уже рассматривался. При этом в основу указанной работы были положены опыты, выполненные инж. Н. Г. Корсаком в механической лаборатории ЛИИЖТ под руководством проф. Н. М. Беляева. Эти опыты производились над бетоном в возрасте от семи дней до трех лет.

В настоящее время нами получены дополнительные данные о механической прочности бетона как в самом раннем его возрасте (1—4 дня), так и в более позднем (6 лет). Результаты этих новых исследований (в части, касающейся прочности бетона в раннем возрасте), дополняющие уже опубликованные данные, освещены в настоящей работе.

2. Описание опытов и характеристики материалов для бетона

Исследованию были подвергнуты следующие механические характеристики бетона: а) сопротивление сжатию; б) сопротивление растяжению; в) сопротивление скалыванию; г) сцепление бетона с арматурой; д) сцепление бетона с ранее затвердевшим бетоном и е) модуль упругости при сжатии. В каждом случае испытания бетона производились в возрасте 1, 2, 4, 7 и 28 дней. Испытание на сжатие и растяжение, кроме того, производилось и в возрасте 14 дней.

Указанным испытаниям подвергался бетон с содержанием цемента в 250, 300, 350 и 450 кг/м³ бетона. Осадка конуса, характеризующая консистенцию бетона, была принята для всех составов равной 10 см, для состава же с расходом цемента 300 кг/м³ (портланд-цемент с активностью $R_u = 380 \text{ кг/см}^2$) исследовался бетон с осадкой конуса 2 и 10 см.

В качестве вяжущего вещества применялись: портланд-цементы с активностью $R_u = 380 \text{ кг/см}^2$ и с активностью $R_u = 195 \text{ кг/см}^2$, пуццолановый портланд-цемент с активностью $R_u = 265 \text{ кг/см}^2$ и глиноземистый цемент с активностью $R_u = 518 \text{ кг/см}^2$.

Все цементы были испытаны в соответствии с ОСТ 3202.

¹ Я. Е. Иохельсон, Н. Г. Корсак, А. В. Саталкин и П. В. Тарасов, Физико-механические свойства бетона, Госстройиздат, 1939.

В качестве мелкого заполнителя вводился песок с модулем крупности $M = 2$ и объемным весом 1600 кг/м^3 , а в качестве крупного заполнителя — гравий или щебень, причем они предварительно рассеивались на четыре фракции: а) от 50 до 40 мм; б) от 40 до 20 мм; в) от 20 до 10 мм и г) от 10 до 5 мм. Дозировка каждой фракции крупной каменной добавки производилась по весу в следующих процентных количествах от общей навески: первая фракция — 20 %, вторая — 40 %, третья — 20 % и четвертая — 20 %.

Для изготовления восьмерок приготавлился бетон со щебнем или гравием крупностью только до 20 мм. При этом фракция 20—10 мм бралась в количестве 65 %, а фракция 10—5 мм в количестве 35 % от общего веса. Вызвано это было относительно малыми размерами поперечного сечения восьмерки.

Изготовление образцов для всех опытов, за исключением испытания сцепления бетона с бетоном, производилось вручную стандартными методами. Отличие изготовления образцов для испытания сцепления бетона с бетоном заключалось в том, что каждый образец готовился в два приема с перерывом, в укладке от

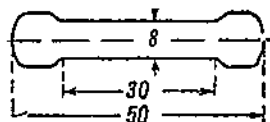


Рис. 1. Образец бетона для испытания на разрыв (размеры в см).

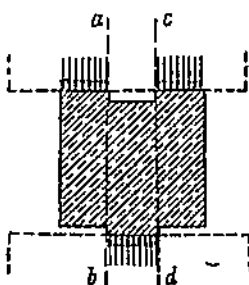


Рис. 2. Образец бетона для испытания на скалывание.

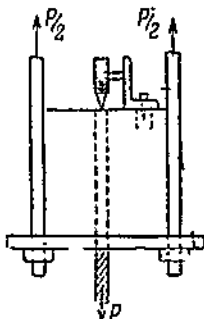


Рис. 3. Образец для испытания сцепления бетона с арматурой.

двух часов до 28 дней. Сроки выдерживания сросшихся образцов до испытания определялись по отношению ко второй прибетонированной части.

В соответствии с родом испытания применялись следующие формы образцов:

- а) на сжатие — кубик размерами $20 \times 20 \times 20 \text{ см}$;
- б) на растяжение — восьмерки сечением $8 \times 8 \text{ см}$ и с рабочей длиной 30 см, при полной длине в 50 см (рис. 1);
- в) форма образца, испытываемого на скалывание, представлена на рис. 2; размеры плоскости сдвига $18 \times 20 \text{ см}$; в расчет вводились две плоскости сдвига (ab и cd);
- г) на сцепление бетона с арматурой — стальной стержень заделывался в кубик размерами $20 \times 20 \times 20 \text{ см}$ на всю высоту кубика (рис. 3);
- д) на сцепление бетона с бетоном — восьмерка таких же размеров, как и на растяжение, но в каждый из двух приемов изготавливалась лишь половина восьмерки; при первом приеме это достигалось путем закладки перегородки из фанеры в средней части;

е) Для определения упругих свойств при сжатии изготавлились призмы высотой 40 см и сечением 20×20 см.

ж) Для определения упругих свойств при растяжении изготавливали восьмерки таких же размеров, как и для определения временного сопротивления разрыву.

Изготовленные образцы выдерживались в формах двое суток, затем их освобождали от форм и до момента испытания хранили в сырых опилках в лаборатории. Если же образцы подлежали испытанию в возрасте одного или двух дней, их испытывали сразу после освобождения от форм. Всего было изготовлено и испытано 1245 образцов.

3. Сопротивление бетона сжатию

Испытания бетона на сжатие производились в возрасте от 1 до 28 дней. При этом в бетоне применялись различные цементы и крупные заполнители. В связи с этим результаты испытаний позволяют выявить влияние на прочность бетона в раннем возрасте как качества цемента, так и рода заполнителя.

Установленные в опытах зависимости временного сопротивления бетона сжатию от водоцементного отношения для каждого из изучавшихся возрастов бетона и сочетания материалов представлены на рис. 4—8. В дальнейшем анализе результатов испытаний ряд выводов дан на основе изучения этих зависимостей и их сопоставления друг с другом.

Прежде всего следует отметить, что как в 28- и 7-дневном возрастах, так и в более раннем возрасте, вплоть до однодневного, прочность бетона закономерно уменьшается по мере увеличения B/C . При этом при применении портланд-цемента относительное влияние B/C в раннем возрасте даже больше, нежели в 28-дневном. Так, например, уменьшение B/C от 0,6 до 0,4 вызывает относительное увеличение прочности бетона в 28-дневном возрасте (портланд-цемент активностью 380 кг/см², крупный заполнитель — гравий), равное примерно 100%, а соответственное увеличение прочности в семи- и однодневном возрасте составляет уже 125 и 450%. При применении пуццоланового и глиноземистого цемента такое влияние возраста на относительное изменение прочности при уменьшении B/C уже не наблюдается (в период от 1 до 28 дней увеличение во всех случаях составляет от 80 до 100%).

Сравнивая, далее, временное сопротивление сжатию в раннем возрасте с величиною его через 28 дней, видим, что на соотношении этих величин сказывается также и качество цемента. Кроме этого, заметное влияние оказывает род заполнителя. Например, при применении портланд-цемента с активностью 380 кг/см² временное сопротивление бетона сжатию через 1 сутки после изготовления составляло 1—6% от 28-дневного временного сопротивления (в среднем 3%); при применении же глиноземистого цемента это соотношение равнялось 75—80% (в среднем 79%); для пуццоланового цемента однодневная прочность составляла 3% 28-дневной прочности. Во всех случаях в качестве крупного заполнителя применялся гравий.

Применение в бетоне щебня взамен гравия несколько улучшило

сопротивляемость бетона сжатию в раннем возрасте; так, в однодневном возрасте при применении портланд-цемента с активностью 380 кг/см² прочность получалась 4—9% (в среднем 7%) от 28-дневной его прочности. Очевидно, что в данном случае форма частиц заполнителя и характер их поверхности повышают сопротивление

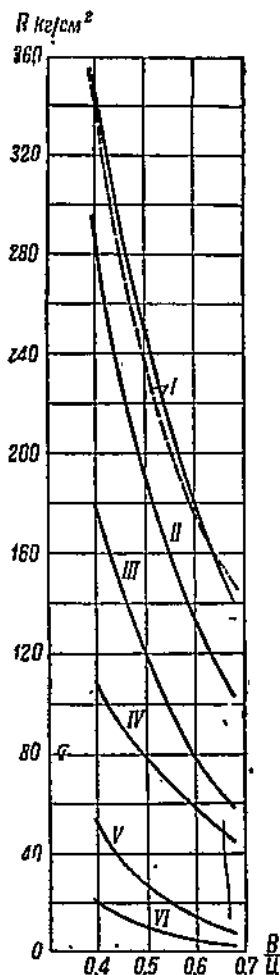


Рис. 4. Зависимость временного сопротивления сжатию от водоцементного отношения.

Портланд-цемент $R_{ц} = 380$ кг/см²; бетон на гравии крупностью 5—50 мм. I—28 дней; II—14; III—7; IV—4; V—2; VI—1 день; пунктирная кривая — гравий крупностью 5—25 мм, 28 дней.

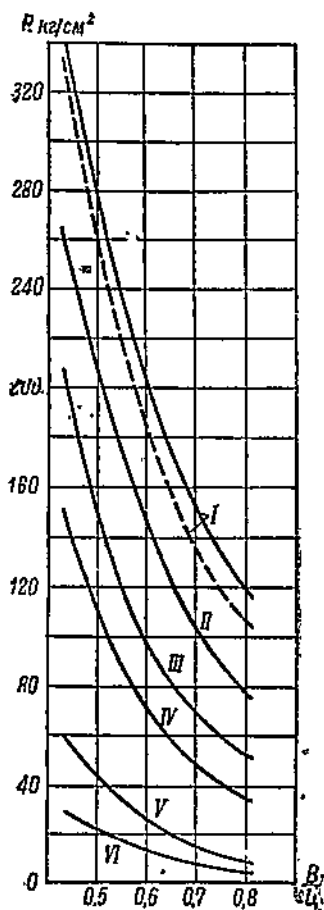


Рис. 5. Зависимость временного сопротивления сжатию от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_{ц} = 380$ кг/см²; бетон на щебне крупностью 5—50 мм. I—28 дней; II—14; III—7; IV—4; V—2; VI—1 день; пунктирная кривая — щебень крупностью 5—20 мм, 28 дней.

бетона особенно в первой стадии его твердения. Результаты, относящиеся ко всем бетонам и возрастам, приводятся в табл. 1. Данные табл. 1 являются характеристиками изменения прочности

Таблица 1

**Изменения прочности бетонов на сжатие в разных возрастах
по отношению к 28-дневной**

Фактический расход цемента кг/м³	Род и активность цемента	Крупный заполнитель	В/Ц	Коэффициент прочности $\alpha = \frac{R_1}{R_{28}} \cdot 100\%$				
				1 день	2 дня	4 дня	7 дней	14 дней
250 300 300 ¹ 300 ² 350 450	Портланд- цемент 380 кг/см³	Гравий	0,68	1	6	31	41	73
			0,55	2	8	30	45	75
			0,49	4	10	30	49	77
			0,60	2	7	30	44	74
			0,46	4	12	30	51	82
			0,40	6	14	30	50	83
Среднее значение			—	3	9	30	46	77
250 300 350 450	Портланд- цемент 380 кг/см³	Щебень	0,81	4	8	30	45	68
			0,63	6	12	34	48	71
			0,55	8	15	37	52	72
			0,43	9	18	45	61	78
Среднее значение			—	7	13	36	51	72
250 300 350 450	Портланд- цемент 195 кг/см³	Гравий	0,72	3	11	26	31	51
			0,60	4	14	29	33	61
			0,53	5	14	28	33	63
			0,51	6	13	28	33	64
Среднее значение			—	4	13	28	32	60
250 300 350 450	Пуццолано- вый порт- ланд-цемент 265 кг/см³	Гравий	0,77	3	8	22	30	66
			0,34	3	7	24	32	66
			0,57	3	8	22	31	62
			0,51	3	8	21	30	57
Среднее значение			—	3	8	22	31	63
250 360 350 450	Глиноземи- стый цемент 518 кг/см³	Гравий	0,63	75	80	76	61	—
			0,51	80	83	77	87	—
			0,45	81	94	86	81	102
			0,41	80	83	75	82	85
Среднее значение			—	79	85	78	78	93

¹ Осадка конуса 2 см.

² Осадка конуса 18 см. Во всех остальных случаях осадка конуса 10 см.

бетона с увеличением его возраста и в дальнейшем будут именоваться коэффициентами прочности (α).

Перейдем теперь к рассмотрению влияния крупного заполнителя на прочность бетона. Результаты опытов показали, что щебень как составная часть бетона обладает преимуществом по сравнению с гравием лишь в наиболее раннем возрасте бетона, как это можно видеть из табл. 2, где помещены средние отношения прочностей гравийного и щебеночного бетонов. Начиная уже с 4—7-дневного возраста гравийный бетон оказывался не менее прочным, а зачастую и более прочным, нежели бетон на щебне.

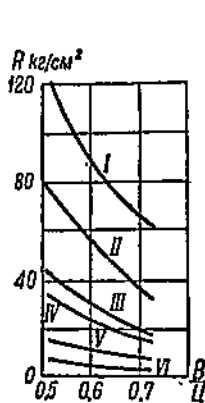


Рис. 6. Зависимость временного сопротивления сжатию от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_{ц} = 195$ кг/см²; бетон на гравии крупностью 5—50 мм. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

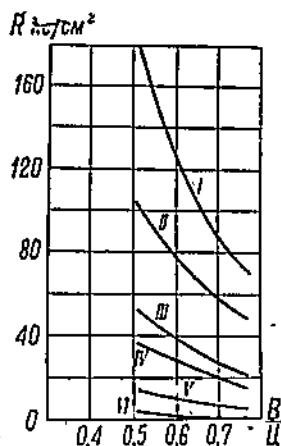


Рис. 7. Зависимость временного сопротивления сжатию от водоцементного отношения.

Пуццолановый портланд-цемент; $R_{ц} = 265$ кг/см²; бетон на гравии крупностью 5—50 мм. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

При этом сравнении подразумеваются бетоны с одинаковым расходом цемента и одинаковой пластичностью. Требования одинаковой пластичности в описываемых опытах приводило к значи-

Таблица 2

Сравнение прочности гравийного и щебеночного бетонов при одинаковой степени пластичности

Расход цемента кг/м ³	В/Ц	Отношение прочности бетона на гравии к прочности его на щебне $\frac{R_{гр}}{R_{щ}}$ в %					
		1 день	2 дня	4 дня	7 дней	14 дней	28 дней
250	0,68	40	89	129	111	105	121
	0,81						
300	0,55	42	78	105	109	123	117
	0,63						
350	0,46	72	94	100	116	135	124
	0,55						
450	0,40	68	78	71	87	111	104
	0,43						
Среднее значение . .		58	85	101	106	118	117

Во второй графе табл. 2 цифры в числителе относятся к гравию, а в знаменателе — к щебню.

тельной разнице в величине водоцементного отношения гравийного и щебеночного бетонов. Повидимому гранулометрический состав, а также форма и поверхность частиц гравия существенно способствовали увеличению подвижности бетонной смеси. Очевидно, что при ином характере частиц гравия можно ожидать меньшего или большего влияния на величину B/C , а следовательно, и на прочность.

Отмеченное различие влияний крупного заполнителя в разных возрастах, повидимому, объясняется следующим образом.

Временное сопротивление бетона сжатию зависит: а) от B/C и б) от формы зерен заполнителя и характера поверхности их. Величина B/C определяет прочность цементного камня, склеивающего зерна агрегатов. Эта прочность увеличивается с течением времени; естественно, что и удельный вес влияния B/C на величину временного сопротивления бетона также увеличивается со временем, так как другие факторы — форма зерен заполнителей и свойства поверхности их — остаются неизменными во времени, а следовательно, неизменным остается и их абсолютное влияние на прочность.

Применение в опытах цементов с различной активностью позволило также установить и изменение прочности бетона в зависимости от качества цемента.

В табл. 3 приведены отношения прочности нормального раствора 1:3 (по сжатию) для всех испытанных цементов в 7- и 28-дневном возрасте. При этом все расчеты сделаны по отношению к соответствующей прочности раствора 1:3, установленной для цемента активностью 195 кг/см². Данные этой таблицы показывают, что различие в ха-

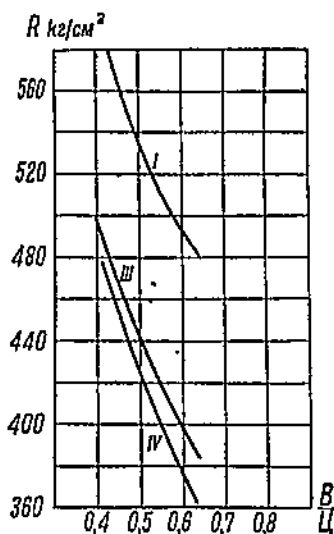


Рис. 8. Зависимость временного сопротивления сжатию от водоцементного отношения.

Глиноземистый цемент; $R_H = 518$ кг/см², бетон на гравии крупностью 5-50 мм. I — 28 дней; II — 2 дня; IV — 1 день.

Таблица 3
Сравнение активностей испытанных цементов

Сроки испытания	Род цемента и активность		
	Портланд-цемент $R_H = 380$ кг/см ²	Пуццолановый цемент $R_H = 265$ кг/см ²	Глиноземистый цемент $R_H = 518$ кг/см ²
7 дней	2,3	1,0	3,5
28 дней	2,0	1,4	2,7
Среднее	2,15	1,20	3,10

фактёре нарастания прочности раствора естественно вызывает и изменение рассматриваемых коэффициентов. Однако в период от 7 до 28 дней это изменение в наших опытах не превышало 10—20% от среднего значения его по каждому цементу.

Сопоставление прочности бетонов, изготовленных с различными цементами, но при одинаковом расходе их и одинаковой степени пластичности, приводится в табл. 4. При этом сравнении все коэффициенты также исчислялись по отношению к соответствующей прочности бетона, изготовленного на портланд-цементе с активностью 195 кг/см².

Таблица 4

Сравнение прочностей бетонов, приготовленных на цементах с различной активностью

Расход цемента кг/м³	Портланд-цемент $R_{ц} = 380 \text{ кг/см}^2$			Пуццолановый цемент $R_{ц} = 265 \text{ кг/см}^2$			Глиноземистый цемент $R_{ц} = 518 \text{ кг/см}^2$		
	Отношение прочности бетонов при сжатии								
	B/C	7 дней	28 дней	B/C	7 дней	28 дней	B/C	7 дней	28 дней
250	$\frac{0,68}{0,72}$	3,2	2,3	$\frac{0,77}{0,72}$	1,2	1,2	$\frac{0,63}{0,72}$	15	7
300	$\frac{0,55}{0,60}$	3,3	2,4	$\frac{0,64}{0,60}$	1,1	1,1	$\frac{0,51}{0,60}$	14	5
350	$\frac{0,46}{0,53}$	3,5	2,5	$\frac{0,57}{0,53}$	1,1	1,2	$\frac{0,45}{0,53}$	11	4
450	$\frac{0,40}{0,51}$	4,3	2,8	$\frac{0,51}{0,51}$	1,3	1,4	$\frac{0,41}{0,51}$	10	3
Среднее значение . .		3,6	2,5	—	1,2	1,2	—	12	5

В графах для B/C цифры в числителе относятся к бетонам на цементах указанных в таблице, а в знаменателе — к бетонам на цементе $R_{ц} = 195 \text{ кг/см}^2$.

Как видно по данным табл. 4, при замене портланд-цемента с активностью 195 кг/см² портланд-цементом с активностью 380 кг/см² временное сопротивление бетона сжатию в 28-дневном возрасте увеличивается в среднем в 2,5 раза, в то время как соотношение активностей равно лишь 2,0. Соответствующие отношения для 7-дневного возраста равны 3,6 (отношение прочностей бетона) и 2,3 (отношение активностей). Для пуццоланового цемента рассматриваемые отношения для нормального раствора и бетона оказались одинаковыми. Замена же портланд-цемента с $R_{ц} = 195 \text{ кг/см}^2$ глиноземистым с $R_{ц} = 518 \text{ кг/см}^2$ вызвала повышение прочности бетона в 7-дневном возрасте в 12 раз, а в 28-дневном возрасте всего лишь в 5 раз, в то время как соотношение активностей сравниваемых цементов не превышает 3,5 (в среднем для обоих возрастов — 3,1).

Приведенный анализ показывает, что между современными характеристиками механической прочности цементов и прочностью

бетон не такой связи, которая по результатам испытаний цементов в стандартном растворе позволила бы предопределить прочность бетона, изготовленного из данного цемента, или при замене одного цемента другим.

4. Сопротивление бетона растяжению

На растяжение испытывались бетонные образцы (восьмерки) с поперечным сечением 8×8 см; в целях возможности сравнения с результатами испытания на сжатие образцы эти испытывались параллельно с кубиками в одинаковом с ними возрасте.

Прежде чем перейти к анализу опытных данных, необходимо отметить, что принятый гранулометрический состав бетона, испытывавшегося на растяжение, был несколько иным, чем у бетона, испытанного на сжатие. Вызвано это было тем, что незначительное сечение образцов не позволило применять заполнитель крупностью до 50 мм, как это было принято для нормального бетона. Поэтому в состав бетона, применявшегося для изготовления восьмерок, вводился гравий или щебень крупностью только до 20 мм. Расход цемента и водоцементное отношение сохранялись такими же, как и для нормального бетона. При указанных условиях бетонная смесь, изготавливавшаяся для восьмерок, оказалась более густой и характеризовалась осадкой конуса в среднем около 4 см вместо 10 см, получавшейся в среднем при изготовлении бетона с более крупным гравием (щебнем). В связи с этим возникла необходимость проверить, как указанное изменение гранулометрии отразилось на прочности бетона. Для этой цели были изготовлены для испытания на сжатие кубики с заполнителем как крупностью до 50 мм, так и крупностью до 20 мм. Во всем остальном бетон был одинаковым в обоих случаях. Результаты указанных испытаний приведены в табл. 5 и на рис. 4 и 5.

Таблица 5

Влияние крупного заполнителя на сопротивление бетона сжатию

Расход цемента кг/м ³	Временное сопротивление сжатию в возрасте 28 дней у бетона, изготовленного на					
	гравий крупностью до			щебень крупностью до		
	50 мм	20 мм	Отношение $\frac{R_{20}}{R_{50}}$	50 мм	20 мм	Отношение $\frac{R_{20}}{R_{50}}$
250	140	149	1,05	116	104	0,90
300	208	203	0,98	178	161	0,90
350	313	268	0,86	248	219	0,88
450	355	345	0,95	338	332	0,98
Среднее значение . . .	—	—	0,96	—	—	0,92

Из приведенных данных видно, что снижение прочности при замене нормального заполнителя более мелким (крупностью до 20 мм) только в одном случае достигло 14%, в среднем же снижение не превышает 4—8%.

Сравнительно небольшое понижение временного сопротивления сжатию при замене гравия или щебня крупностью до 50 мм гравием или щебнем до 20 мм позволяет дальнейшие общие выводы о сопротивлении бетона растяжению распространить и на бетон с крупным (до 50 мм) гравием или щебнем.

Результаты испытаний восьмерок на растяжение представлены графически на рис. 9—13.

Так же, как и при сжатии, временное сопротивление растяжению прежде всего рассматривается в зависимости от водоцементного отношения, как фактора, определяющего в основном проч-

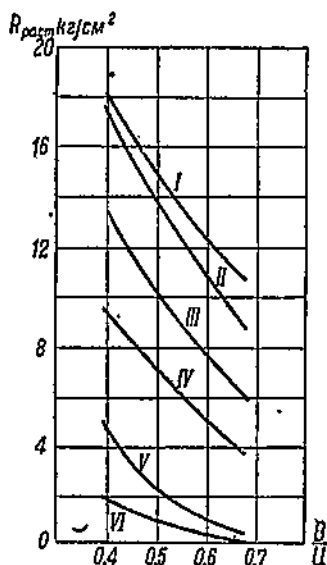


Рис. 9. Зависимость временного сопротивления растяжению от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_n = 380$ кг/см², бетон на гравии. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

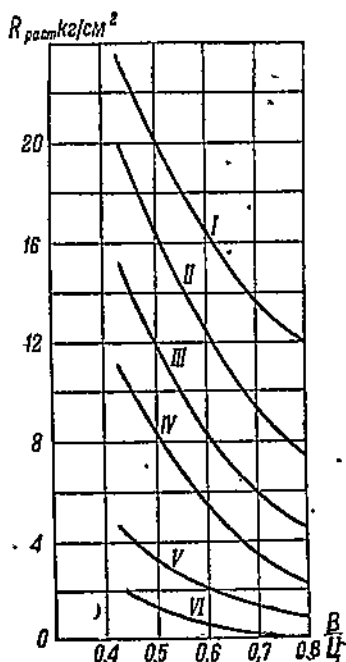


Рис. 10. Зависимость временного сопротивления растяжению от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_n = 380$ кг/см², бетон на щебне. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

ность бетона данного возраста и из данных материалов. Влияние B/C на прочность бетона при растяжении аналогично влиянию на прочность при сжатии. При этом в раннем возрасте бетона это влияние на сопротивление растяжению оказывается наиболее сильным. Так, например, в однодневном возрасте сопротивление портланд-цементного бетона ($R_n = 380$ кг/см²) растяжению при изменении B/C от 0,40 до 0,70 уменьшается в 9—10 раз, в то время как при таком же изменении B/C , но в 28-дневном возрасте, сопротивление растяжению уменьшается всего лишь в 2 раза. Такое

относительное влияние B/C имеет место при применении в качестве крупного заполнителя как гравия, так и щебня. Отсюда вытекает, что при низком значении B/C бетон твердеет в первые дни более интенсивно, нежели в случае более высокого значения этого отношения.

Для бетона на пуццолановом и глиноземистом цементах такое относительное влияние B/C на сопротивление растяжению почти не наблюдается (в обоих случаях для указанных возрастов изменение составляет от 1,5 до 2,5 раз).

Сравним, далее, величины временного сопротивления бетона растяжению в том или ином возрасте с «конечным» значением его, за которое, как и при сжатии, примем временное сопротивление растяжению бетона в возрасте 28 дней. В табл. 6 приведены со-

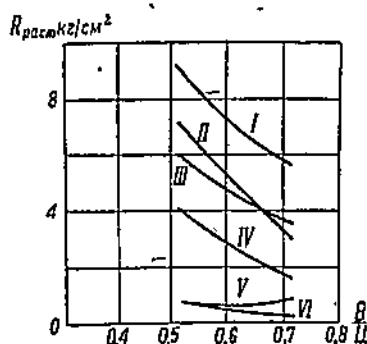


Рис. 11. Зависимость временного сопротивления растяжению от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_{ц} = 195 \text{ кг/см}^2$, бетон на гравии. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

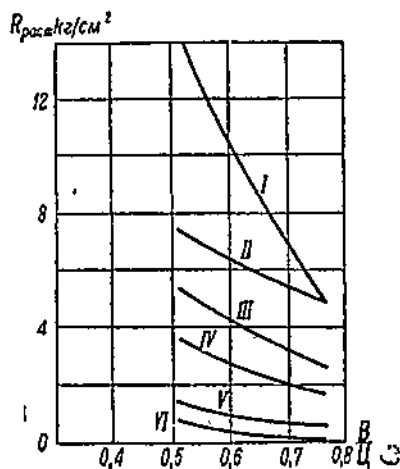


Рис. 12. Зависимость временного сопротивления растяжению от водоцементного отношения.

Пуццолановый портланд-цемент; $R_{ц} = 265 \text{ кг/см}^2$, бетон на гравии. I — 28 дней; II — 14; III — 7; IV — 4; V — 2; VI — 1 день.

ответствующие коэффициенты прочности ($\alpha_p = \frac{R_t}{R_{28}}$). Рассматривая данные этой таблицы, можно видеть, что величина отношения α_p зависит прежде всего от качества цемента. Заметно также влияние B/C и качества крупного заполнителя.

Действительно, если временное сопротивление портланд-цементного бетона ($R_{ц} = 380 \text{ кг/см}^2$) растяжению через 1 сутки составляет в среднем всего лишь 6% от 28-дневной величины временного сопротивления, то при применении глиноземистого цемента через сутки имеем уже 86%. Такая доля 28-дневного временного сопротивления растяжению при портландском цементе ($R_{ц} = 380 \text{ кг/см}^2$) достигается лишь через 12—14 дней, а при низкой марке цемента (например, при $R_{ц} = 195 \text{ кг/см}^2$) и еще позже. При пуццолановом цементе однодневное временное сопротивление рас-

**Изменение прочности на растяжение бетонов в разных возрастах,
отнесенное к 28-дневной прочности**

Расход цемента кг/м³	Род и активность цемента	Крупный заполнитель	В/Ц	Коэффициент прочности $\sigma_p = \frac{R_t}{R_{28}} \cdot 100\%$				
				1 день	2 дня	4 дня	7 дней	14 дней
250 300 300 300 350 450	Портланд- цемент 380 кг/см²	Гравий	0,68	2	4	35	56	82
			0,55	5	10	44	64	88
			0,49	7	16	48	69	92
			0,60	3	6	41	63	87
			0,46	8	19	49	70	94
			0,40	10	26	52	74	97
Среднее значение			—	6	14	45	66	90
250 300 350 450	Портланд- цемент 380 кг/см²	Щебень	0,81	2	7	17	38	61
			0,63	3	12	29	47	74
			0,55	4	15	36	53	76
			0,43	8	19	47	65	77
Среднее значение			—	4	11	32	51	72
250 300 350 450	Портланд- цемент 195 кг/см²	Гравий	0,72	4	13	27	51	62
			0,60	7	8	34	70	62
			0,53	8	8	44	78	64
			0,51	9	9	45	79	66
Среднее значение			—	7	9	37	69	63
250 300 350 450	Пуццолано- вый порт- ланд-цемент 265 кг/см²	Гравий	0,77	4	12	35	53	100
			0,64	5	9	27	52	71
			0,57	5	9	25	46	56
			0,51	6	10	25	46	50
Среднее значение			—	5	10	28	49	69
250 300 350 450	Глиноземи- стый цемент 518 кг/см²	Гравий	0,63	77	93	83	68	—
			0,51	85	88	79	72	—
			0,45	88	84	76	72	82
			0,41	95	88	79	76	84
Среднее значение			—	86	88	79	73	83

тяжению в данных опытах оказалось, примерно, равным 5% от 28-дневного значения.

Таким образом процесс нарастания временного сопротивления гравийного бетона растяжению оказался весьма схожим с процессом нарастания временного сопротивления сжатию, рассмотренным выше.

Необходимо отметить, что при испытании бетона на растяжение не было установлено положительное влияние замены гравия щебнем. Наоборот, как это видно из табл. 6, интенсивность нарастания временного сопротивления бетона растяжению оказалась меньшей в случае применения в бетоне щебня, а не гравия. Повидимому, повышенное значение B/C , необходимое для уравнивания степени пластичности щебеночного бетона с пластичностью гравийного бетона, оказало доминирующее влияние на темп нарастания прочности, преодолев положительное влияние шероховатости поверхности щебенки и их формы.

В табл. 7 приведено сравнение прочностей гравийного и щебеночного бетонов при растяжении.

Сопоставление величин временного сопротивления растяжению бетонов, изготовленных на разных цементах, но с одинаковым расходом их и одинаковой степенью пластичности, приведено в табл. 8. При исчислении коэффициентов, помещенных в

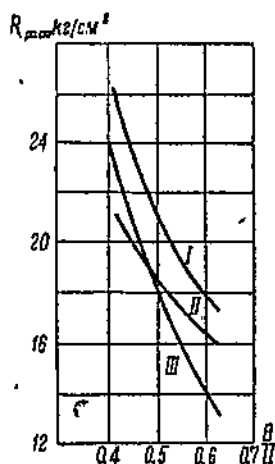


Рис. 13. Зависимость временного сопротивления растяжению от водоцементного отношения.

Глиноземистый цемент; $R_d = 618 \text{ кг/см}^2$, бетон на гравии.
I — 28 дней; II — 2 дня;
III — 1 день.

Таблица 7

Расход цемента кг/м³	B/C	Отношение прочности бетона на гравии к прочности его на щебне $R_{гр}/R_{щ}$ в %					
		1 день	2 дня	4 дня	7 дней	14 дней	28 дней
250	$\frac{0,68}{0,81}$	100	50	185	135	94	91
300	$\frac{0,55}{0,63}$	175	61	138	124	106	89
350	$\frac{0,46}{0,55}$	162	123	121	119	109	89
450	$\frac{0,40}{0,43}$	90	109	85	82	97	77
Среднее значение		132	86	132	115	101	86

Во второй графе табл. 7 цифры в числителе относятся к гравию, а в знаменателе — к щебню.

Отсюда вытекает, что при оценке влияния качества цемента на сопротивление бетона разрыву необходимо в качестве основной характеристики прочности цемента принимать временное сопротивление разрыву стандартного раствора (1:3).

Сопоставим теперь величины временного сопротивления бетона сжатию и растяжению. Для этого в табл. 9 приведены значения

Таблица 9

Сравнение прочности на разрыв с прочностью на сжатие

Расход цемента кг/м³	Род и активность цемента	В/Ц	Крупный заполня- тель	Отношение прочности на разрыв к прочности на сжатие в %					
				1 день	2 дня	4 дня	7 дней	14 дней	28 дней
250	Портланд-цемент 380 кг/см²	0,68	Гравий	10	5	8	11	11	8
300		0,55		14	6	9	9	8	9
300		0,49		11	9	9	8	7	6
300		0,60		13	6	9	10	8	7
350		0,46		10	9	9	8	7	6
450		0,40		9	10	9	7	6	5
Среднее значение				11	7	9	9	8	7
250	Портланд-цемент 380 кг/см²	0,81	Щебень	4	9	6	9	9	10
300		0,63		3	8	7	8	9	8
350		0,55		4	7	7	8	8	8
450		0,43		6	7	5	7	7	7
Среднее значение				4	8	6	8	8	8
250	Портланд-цемент 195 кг/см²	0,72	Гравий	10	10	9	9	11	9
300		0,60		12	4	11	17	9	8
350		0,53		12	4	12	17	7	7
450		0,51		11	5	10	17	7	7
Среднее значение				11	6	10	15	8	8
250	Пуццолановый портланд-цемент 265 кг/см²	0,77	Гравий	10	10	11	12	10	7
300		0,64		13	10	10	13	9	8
350		0,57		15	11	9	12	8	8
450		0,51		16	9	9	12	7	8
Среднее значение				13	10	10	12	8	8
250	Глиноземистый цемент 518 кг/см²	0,63	Гравий	4	4	4	4	4	4
300		0,51		4	4	4	3	—	4
350		0,45		5	4	4	4	3	4
450		0,41		5	4	4	4	4	4
Среднее значение				4	4	4	4	4	4

временного сопротивления бетона растяжению в процентах от соответствующей величины временного сопротивления сжатию. Данные табл. 9 наглядно показывают, что при применении портланд-цемента или пуццоланового цемента сопротивление бетона растяжению в 28-дневном возрасте составляет, примерно, 8% от сопротивления сжатию, отклоняясь от этого значения лишь в нескольких случаях и притом сравнительно незначительно. В раннем возрасте это соотношение преимущественно в пользу сопротивления растяжению. Так, в случае гравийного бетона оно в среднем равнялось 11—13%, достигая в частных случаях 12—16%. Исключение составил, как это и отмечалось выше, бетон, изготовленный со щебнем взамен гравия, для которого наблюдалось нарастание сопротивления растяжению в течение всего рассмотренного периода (от 1 до 28 дней) более интенсивное, нежели нарастание сопротивления сжатию, в соответствии с чем рассматриваемые коэффициенты для ранних сроков, как правило, имеют более низкое значение, нежели в 28-дневном возрасте.

Что касается быстротвердеющего глиноземистого цемента, то, начиная с первых суток и до 28-дневного возраста, величина временного сопротивления глиноземистого бетона растяжению держалась почти на одном уровне, равном 4% величины временного сопротивления сжатию.

5. Сопротивление бетона скалыванию

Прежде чем переходить к анализу опытных данных, относящихся к сопротивлению бетона скалывающим усилиям, необходимо заметить, что опыты производились над образцами бетона, изготовленными на портланд-цементе с активностью 380 кг/см². В качестве крупного заполнителя применялся только гравий (5—50 мм). Форма образца, испытывавшегося на скалывание, а также схема испытания и распределения усилий, действующих на образец, указаны на рис. 2.

При определении временного сопротивления бетона скалыванию (τ_c) в расчет вводились две плоскости скалывания, хотя видимые трещины при испытании некоторых образцов наблюдались лишь в одной плоскости. Таким образом величина τ_c определялась делением наибольшего груза, выдерживаемого образцом, на площадь, равную $2 \cdot (18 \times 20) = 720 \text{ см}^2$. Характер разрушения одного из образцов бетона показан на рис. 14.

На рис. 15 показана зависимость временного сопротивления бетона скалыванию от водоцементного отношения. Рассматривая рис. 15, можно видеть, что эта зависимость вполне аналогична кривой Абрамса для сопротивления бетона сжатию.

Относительное изменение временного сопротивления скалыванию с изменением возраста определялось так же, как и в предыдущих опытах, по отношению к 28-дневной его прочности. Результаты этих сравнений приведены в табл. 10.

Как видно из этой таблицы, величины средних значений коэффициентов (α_c), характеризующих нарастание сопротивления бетона скалыванию, изменяются в среднем от 4% в 1-й день и до 55%

на 7-й день твердения, меняясь сравнительно мало для бетонов различных составов.

При сравнении коэффициентов α_c , полученных при испытании на скалывание, с коэффициентами α , характеризующими нарастание временного сопротивления сжатию, заметно, что коэффициенты при скалывании несколько выше, чем при сжатии, что говорит о большей интенсивности нарастания сопротивления скалыванию.

Сравнивая величины временных сопротивлений скалыванию и сжатию (табл. 10), можно видеть, что величина временного сопротивления скалыванию составляет в первые дни твердения бетона от 20 до 30%, а через 7 и 28 дней — около 20% от временного сопротивления сжатию.



Рис. 14. Характер разрушений при испытании на скалывание.

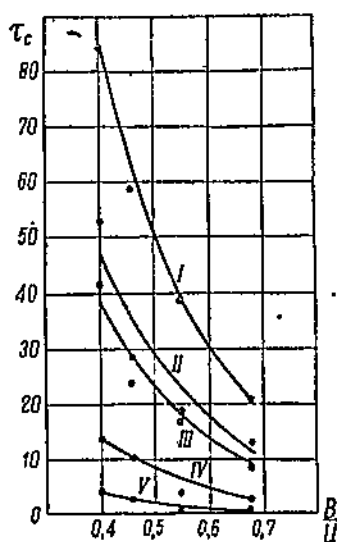


Рис. 15. Зависимость временного сопротивления бетона скалыванию от водоцементного отношения.

Портланд-цемент; $R_{II} = 380 \text{ кг/см}^2$, бетон на гравии. I—28 дней; II—7; III—4; IV—2; V—1 день.

Таблица 10

Зависимость прочности на скалывание от возраста бетона и отношение прочности на скалывание к прочности на сжатие в различных возрастах

Расход цемента кг/м^3	B/C	Изменение прочности на скалывание в разных возрастах по отношению к 28-дневной прочности в % (α_c)				Отношение прочности на скалывание к прочности на сжатие ($\frac{T_c}{R}$) в %				
		1 день	2 дня	4 дня	7 дней	1 день	2 дня	4 дня	7 дней	28 дней
250	0,68	2	12	43	52	20	32	20	19	15
300	0,55	3	16	45	59	20	34	27	23	18
350	0,46	5	17	44	57	22	31	32	25	21
450	0,40	5	16	46	54	20	29	36	25	24
Среднее значение		4	15	44	55	20	31	29	23	19

6. Сцепление бетона с арматурой

Величина сцепления бетона с арматурой устанавливалась путем вытаскивания стального стержня, заделанного в бетонный кубик, как это указано на рис. 3.

При испытании нагрузка на стержень увеличивалась постепенно до достижения максимальной величины, при которой полностью преодолевались силы сцепления и трения бетона с железом. Подробности методики этого испытания были изложены ранее.¹ Ука-

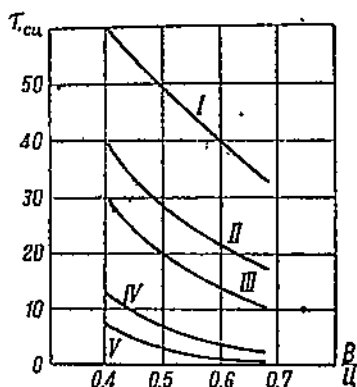


Рис. 16. Зависимость величины удельного сцепления бетона с арматурой.

Портланд-цемент; $R_D = 380 \text{ кг/см}^2$.
бетон на гравии. I—28 дней; II—7;
III—4; IV—2; V—1 день.

жем лишь, что при производстве испытаний, описываемых в настоящей работе, методика определения силы сцепления арматуры с бетоном была дополнительно изучена в отношении влияния глубины заделки стержня в бетон. В целях выявления этого влияния было испытано несколько образцов, в которых арматура заделывалась на 10 и 40 см и результаты сравнивались с прежними испытаниями при заделке на 20 см. В этих опытах применялся бетон с расходом цемента в 250 кг/м^3 при $B/C = 0,75$, активность портланд-цемента — 264 кг/см^2 , испытания силы сцепления производились через 28 дней после изготовления образцов.

В результате испытаний были установлены следующие величины удельной силы сцепления арматуры с бетоном:

При заделке арматуры на глубину	10 см	— 19,6	кг/см ²
" " " " "	20 см	— 19,1	"
" " " " "	40 см	— 20,1	"

Эти данные показывают, что, при правильной центрировке испытуемых образцов, глубина заделки арматуры практически не влияет на величину удельной силы сцепления ее с бетоном.

Излагаемые ниже результаты опытов, так же как и опубликованные ранее, относятся поэтому к образцам с заделкой арматуры на глубину 20 см.

Сравнивая силу сцепления в возрастах от 1 до 7 дней с силой сцепления в 28-дневном возрасте, можно видеть (табл. 11 и рис. 16), что относительная величина сцепления бетона с арматурой, характеризуемая коэффициентом $\alpha_{\text{сц}}$, с изменением возраста бетона меняется совершенно так же, как коэффициент α_r при растяжении и α_c при скалывании и лишь несколько иначе, чем коэффициент α при сжатии. Относительная величина сцепления (коэффициент $\alpha_{\text{сц}}$) со-

¹ Я. Е. Иохельсон, И. Г. Корсаков, А. В. Саталкин, И. В. Тарасов, Физико-механические свойства бетона, Госстройиздат, 1939.

ставляет в однодневном возрасте в среднем 6%, а в 7-дневном — 60% (за округлением) от 28-дневной силы сцепления (для сжатия) при тех же возрастах мы имели соответственно 3 и 46%). Необходимо обратить внимание, что коэффициент $\alpha_{сж}$, особенно в ранних возрастах (1—2 дня), очень сильно меняется при изменении расхода цемента при соответствующем изменении B/C . Если в однодневном возрасте, при расходе цемента в 250 кг/м^3 и $B/C = 0,68$, коэффициент $\alpha_{сж} = 2\%$, то при расходе цемента в 450 кг/м^3 и $B/C = 0,40$ он равен 11%. При этом предполагается, что пластичность бетонной смеси одинакова.

Таблица 11

Расход цемента кг/м^3	B/C	Относительное уменьшение удельного сцепления в разных возрастах в сравнении с 28-дневным в %				Отношение удельного сцепления к прочности на сжатие в %				
		1 день	2 дня	4 дня	7 дней	1 день	2 дня	4 дня	7 дней	28 дней
250	0,68	2	6	31	53	30	25	23	30	23
300	0,55	4	12	38	55	34	28	26	25	20
350	0,46	8	17	43	61	32	26	26	23	18
450	0,40	11	20	48	66	31	25	27	22	17
Среднее значение	—	6	14	20	59	32	26	25	25	20

† Результаты вычислений относятся только к нагрузке $P_{\max}$.

Сопротивление сцепления составляет от 20 до 32% от величины временного сопротивления сжатию, причем большее значение (32%) относится к бетону в однодневном возрасте, а меньшее (20%) к 28-дневному возрасту.

Интенсивность роста удельной силы сцепления понижается в сравнении с интенсивностью роста сопротивления сжатию при увеличении возраста. По всей вероятности, это явление можно объяснить развитием усадки бетона.

В связи с тем, что наибольший практический интерес представляет сцепление арматуры с бетоном в изгибаемых элементах конструкций, нами были произведены соответствующие опыты с армированными балками. Испытывавшиеся балки имели размеры $15 \times 15 \times 120 \text{ см}$ при расчетном пролете $l = 100 \text{ см}$. Армировалась каждая балка одним стержнем диаметром 20 мм. При этом часть балок армировалась прямыми стержнями (без крюков на концах), другая же часть — стержнями, оканчивающимися крюками Конси-дера.

Арматура располагалась в растягиваемой зоне балки на глубине 2 см от нижней поверхности. Испытание бетона производилось на прессе Амслера нагрузкой, сосредоточенной посредине пролета (рис. 17). Для наблюдения за смещением стержня арматуры после нарушения сцепления его с бетоном, в торцовых сечениях балок заделывались (при изготовлении балок) деревянные пробки, к которым крепились мессуры. Арматура с торца балки обнажалась и перед началом испытания подвижной стержнек мессуры приводился в соприкосновение с нею.

Сила, выдергивающая арматуру из бетона, определялась по деформациям арматуры, для измерения которых в каждой балке в среднем сечении арматура обнажалась (для чего при изготовлении балочки в эти места закладывали пробки) и на нее устанавливался тензометр Гутенберга. По деформациям вычислялось напряжение в арматуре σ_a , а затем и полное усилие, действующее на арматуру и равное $P_{max} = \sigma_a \cdot \frac{\pi d^2}{4}$.

В силу незначительности армирования балок в наших опытах разрушение их происходило от разрыва бетона в нижней (растянутой) зоне и последующего нарушения сцепления бетона с арматурой. Это позволяло вести вычисления усилий в арматуре по указанной выше формуле, причем напряжение в арматуре (σ_a), принятое в расчет, относилось к тому моменту, когда нагрузка на балку достигала максимального значения.

В результате испытаний были установлены следующие величины σ_d : для прямой арматуры (без крюков) в среднем $\sigma_d = 1450 \text{ кг/см}^2$; для арматуры с крюками $\sigma_d = 1750 \text{ кг/см}^2$. Удель-

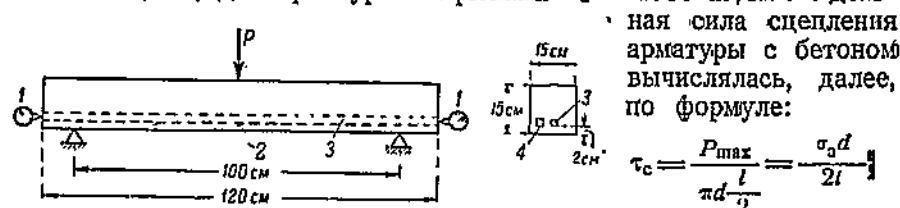


Рис. 17. Схема испытания армированных балочек.

1 — мессура; 2 — тензометры Гугенбергера; 3 — арматура;
4 — деревянная пробка для прикрепления мессуры.

где d — диаметр арматуры.

l — длина балки.

При принятом в опытах диаметре арматуры $d = 2$ см и длине балки $l = 120$ см

$$\tau_c = \frac{\sigma_d}{120} \text{ кг/см}^2.$$

В соответствии с этим сила сцепления арматуры с бетоном определялась следующей величины (в среднем):

При прямых стержнях (без крюков) . . $\tau_0 = 12 \text{ кг/см}^2$;

„ наявності крюків Консидера . . . $\tau_c = 14,5$ „

Соответствующая удельная сила сцепления арматуры с бетоном, установленная путем опыта по вытаскиванию арматуры из бетонного кубика, равнялась $19,1 \text{ кг/см}^2$. Таким образом оказалось, что при изгибе балок удельная сила сцепления на 37% ниже, нежели при выдергивании арматуры осевой силой при отсутствии крючков на концах арматуры, и на 24% ниже при наличии крючков.

Объяснение этому, очевидно, следует искать в том, что в балках арматура закладывалась вблизи поверхности (защитный слой бетона 2 см), причем в зоне сильно напряженного, а следовательно, деформирующегося, бетона.

Интересно здесь же отметить, что теоретический расчет удельной силы сцепления арматуры с бетоном по величине перерезы-

вающей силы приводит почти к тем же результатам, что и определение силы сцепления по деформациям арматуры (без крюков). Действительно, удельная сила сцепления бетона с арматурой может быть подсчитана по формуле:

$$\tau_c = \frac{Q}{uz},$$

где Q — перерезывающая сила (в нашем случае $Q = \frac{P}{2}$),

u — периметр сечения арматуры, равный πd ,

z — плечо пары внутренних усилий, сжимающих в бетоне и растягивающих в арматуре; при этом

$$z = h - \frac{x}{3},$$

где h — рабочая высота, x — положение нейтральной оси.

Рассчитанное по этой формуле значение τ_c в наших опытах определилось 10—11 кг/см², т. е. достаточно близко к величине удельного сцепления, установленного для прямой арматуры по ее деформации (12 кг/см²).

7. Сцепление бетона с ранее отвердевшим бетоном

Сила сцепления бетона с ранее отвердевшим бетоном определялась путем растяжения образцов-восьмерок, изготовленных в два приема с перерывом в бетонировании в 1, 2, 4 и 7 дней для бетонов с расходом цемента в 250, 300, 350 и 450 кг/м³ одинаковой пластичности (осадка конуса 10 см). Испытание производилось через 7 дней после бетонирования второй половины образца. При перерыве в бетонировании в 7 дней изготавливали два комплекта образцов, причем второй комплект испытывали, когда вторая половина образца достигала 28-дневного возраста.

Кроме этого, была изготовлена серия образцов с расходом цемента в 250 и 300 кг/м³ с перерывом в бетонировании 2, 4, 8 и 12 часов и 1, 2, 3, 4, 7, 14 и 28 дней. Испытание этих образцов было произведено через 28 дней после изготовления второй половины образца.

При изготовлении каждой части образца в средней части формы устанавливалась фанерная перегородка. Через два дня после бетонирования первой части образец освобождался от формы; одновременно снимали и перегородку. Необходимо отметить, что поверхности соприкосновения нового бетона со старым не подвергались никакой обработке кроме увлажнения. Величина сцепления бетона с бетоном определялась аналогично временному сопротивлению при растяжении, и в каждом отдельном случае отмечалось место разрыва (по шву или вне шва). Величины вычисленных напряжений, характеризующих силу сцепления бетона с ранее отвердевшим бетоном, приводятся в табл. 12.

В рассматриваемых опытах для бетона применялся портланд-цемент с активностью 380 кг/см² и гравий крупностью от 5 до 20 мм.

**Результаты испытания на сцепление бетона с бетоном
(средние из 2 испытаний)**

Портланд-цемент активностью 380 кг/см ²					
В/Ц		0,63	0,55	0,46	0,40
Расход цемента кг/м ³		250	300	350	450
Удельная сила сцепления в кг/см ²					
Время перерыва в бетонировании	Возраст при испытании				
1 день	7 дней	5,1	9,9	6,2	10,6
2 дня	7 "	4,1	9,1	4,5	10,1
4 "	7 "	4,5	5,3	5,9	10,1
7 дней	7 "	5,0	4,5	5,1	5,5
2 часа	28 "	8,5	11,1	—	—
4 "	28 "	8,4	10,0	—	—
8 часов	28 "	10,0	11,9	—	—
12 "	28 "	11,3	13,5	—	—
1 день	28 "	8,7	10,4	—	—
2 дня	28 "	9,3	12,1	—	—
3 "	28 "	7,5	16,0	—	—
4 "	28 "	6,9	10,8	—	—
7 дней	28 "	7,8	13,7	14,5	17,5
14 "	28 "	12,4	14,3	—	—
28 "	28 "	7,8	7,8	—	—

Как видно из данных, приведенных в табл. 12, сцепление бетона с бетоном по сечению в стыке при перерыве в бетонировании от 2 до 24 часов достаточно велико, так как почти все образцы разорвались вне шва стыкования. При увеличении же перерыва в бетонировании от 2 до 28 дней в большинстве случаев разрыв происходил по шву.

Из 40 образцов этой группы 15 разорвались вне шва и 25 по шву. Это указывает на то обстоятельство, что по мере увеличения срока перерыва в бетонировании сопротивление бетона растяжению нарастает интенсивнее, нежели сила сцепления его со старым бетоном.

Вместе с тем следует все же отметить, что даже при длительном перерыве в бетонировании (до 28 дней) сила сцепления нового бетона со старым значительна; в худшем случае она оказывалась ниже временного сопротивления нового бетона разрыву не более, чем на 30—35%. При кратковременном перерыве (до 1—2 дней) разница в этих величинах не превосходит 10—15%.

8. Модуль упругости бетона при сжатии

Определение модуля упругости бетона производилось путем испытания на сжатие призм высотой 40 см, с поперечными размерами 20 × 20 см. Бетон, как и в предыдущих опытах, изготовлялся на портланд-цементе с активностью 380 кг/см² и на гравии

Модули упругости бетона при сжатии

Напря- жение полное (с учетом обжатия) кг/см ²	Активность цемента $R_{\text{ц}} = 380 \text{ кг/см}^2$									
	Возраст бетона									
	1 день		2 дня		4 дня		7 дней		28 дней	
	Модуль упругости по деформациям в тыс. кг/см ²									
	полным	упругим	полным	упру- гим	полным	упругим	полным	упругим	полным	упругим

Расход цемента 250 кг/м³, В/Ц = 0,68

5	—	—	363	47	346	437	227	227	—	—
7,5			153	188	230	257	192	200		
10,0			71	115	156	157	203	234		
12,5			35	81	113	168	169	217	400	476
15,0					84	118	167	205	379	417
20,0							141	180	324	336
25,0							123	153	304	312
30,0									272	284
40,0									248	262
50,0									215	240
60,0									136	220
70,0									160	201
80,0									136	175

Расход цемента 300 кг/м³, В/Ц = 0,55

5,0	35	38	139	312	—	—	250	260	—	—
7,5			45	82	—	—	451	291	—	—
10,0			23	69	—	—	314	300	—	—
12,5					—	—	278	295	357	476
15,0							252	289	431	500
20,0							233	271	372	486
25,0							218	263	326	395
30,0							206	248	327	372
40,0							185	231	293	323
50,0							171	229	275	302
60,0							157	204	253	285
70,0									227	262
80,0									225	254
100,0									198	240

Расход цемента 350 кг/м³, В/Ц = 0,46

5,0	31	67	147	278					—	—
7,5	18	64	147	208			312	312		
10,0			123	159			312	341	288	375
12,5			126	159			294	312	288	209
15,0			113	129			255	298	231	261
20,0			75	96			243	261	219	230
25,0							244	281	225	234
30,0							231	272	265	275
40,0							208	244	280	289
50,0							186	221	261	266

Напря- жение полное (с учетом обжатия) кг/см ²	Активность цемента $R_{\text{ц}} = 380 \text{ кг/см}^2$									
	Возраст бетона									
	1 день		2 дня		4 дня		7 дней		28 дней	
	Модуль упругости по деформациям в тыс. кг/см ²									
	полным	упругим	полным	упру- гим	полным	упругим	полным	упругим	полным	упругим
60,0							151	198	265	272
70,0							136	180	256	277
80,0									255	278
100,0									254	287

Расход цемента 450 кг/м^3 , $B/C = 0,40$

5,0	86	91	147	250			—	—	—	—
7,5	30	70	128	192			275	310	—	—
10,0			127	178			250	294	—	—
12,5			123	178			268	278	—	—
15,0			117	167			269	286	379	568
20,0			110	155			321	276	407	583
25,0			89	136			253	286	424	549
30,0			69	116			228	260	459	573
40,0							218	243	507	605
50,0							208	234	362	409
60,0							195	195	371	383
70,0							184	211	342	377
80,0							167	167	336	364
100,0									322	344
150,0									282	311

крупностью от 5 до 50 мм. Измерение деформаций производилось при помощи зеркального прибора Мартенса.¹

Величины найденных модулей упругости, исчисленных как по полным, так и по упругим деформациям, приводятся в табл. 13. Как видно из приведенных данных, модуль упругости является переменной величиной, зависящей не только от рода деформации (упругая или полная), но и от того напряжения, при котором измерены деформации. Кроме того, модуль упругости зависит от качества бетона и от его возраста.

Однако, для всех бетонов, вне зависимости от их качества, можно констатировать полную аналогичность в отношении зависимости модуля упругости от напряжения; во всех случаях, вплоть до разрушения бетона, модуль упругости постепенно падает, причем уменьшение модуля упругости идет быстрее у бетона с большим B/C и с малым расходом цемента. Особенно низкие упругие свойства показали бетоны в первые дни твердения.

¹ Подробно о методике испытания см. Я. Е. Иохельсон, Н. Г. Корса, А. В. Саталкин и П. В. Тарасов, Физико-механические свойства бетона, Госстройиздат, 1939.

Рассмотренные выше значения модулей упругости относятся к бетону при напряжении от 2,5 кг/см² до временного сопротивления сжатию (или близкого к последнему).

С практической точки зрения представляет большой интерес сравнение модулей упругости соответствующих расчетным (т. е. допускаемым) напряжениям в бетоне. В зависимости от качества бетона, очевидно, что каждому бетону при этом будет соответствовать своя допускаемая величина напряжения. Если принять коэффициент запаса прочности бетона равным 2,2, то для каждого бетона может быть установлено допускаемое значение напряжения R_0 , равное:

$$R_0 = \frac{R_{np}}{2,2},$$

где R_{np} — временное сопротивление призмы, испытанной на упругие свойства.

Таким образом в дальнейшем все бетоны рассматриваются как бы в предельно допустимом напряженном состоянии, к которому и относятся сравниваемые между собой величины E_0 . Для этой цели составлена табл. 14, где приведены E_0 , соответствующие напряжению R_0 и установленные при обработке результатов испытаний графическим путем.

Таблица 14

Модули упругости при сжатии, соответствующие допускаемым напряжениям

Возраст бетона	Расход цемента кг/м ³	В/Ц	Допускаемое напряжение R_0 кг/см ²	Модуль упругости при сжатии кг/см ²	
				по полным деформациям	по упругим деформациям
1 день	250	0,68	—	—	—
	300	0,55	2,7	—	—
	350	0,46	5,7	274 000	65 000
	450	0,40	5,9	66 000	85 000
Средние значения				46 900	75 000
2 дня	250	0,68	6,8	—	—
	300	0,55	6,8	60 000	100 000
	350	4,46	13,2	114 000	145 000
	450	0,40	19,0	101 000	152 000
Средние значения				91 600	132 000
4 дня	250	0,68	10,9	150 000	190 000
7 дней	250	0,68	23	130 000	163 000
	300	0,55	40	189 000	232 000
	350	0,46	50	200 000	223 000
	450	0,40	61	190 000	215 000
Средние значения				177 000	208 000
28 дней	250	0,68	53	208 000	235 000
	300	0,55	80	217 000	250 000
	350	0,46	127	253 000	290 000
	450	0,40	146	290 000	315 000
Средние значения				242 000	272 000

По данным этой таблицы построена графическая зависимость E_0 от напряжения R_0 (рис. 18) для всех бетонов, вне зависимости от их возраста и от качества бетона.

Величины модулей упругости в этом случае получились также переменными. С увеличением конечной прочности бетона E_0 увеличивается несмотря на то, что напряжение во всех случаях соответствовало допускаемому (рабочему) значению. Следовательно, основным фактором, определяющим величину E_0 , является «конечное» сопротивление бетона сжатию, которое, как известно, может быть достигнуто различными путями. Но, вместе с тем, практи-

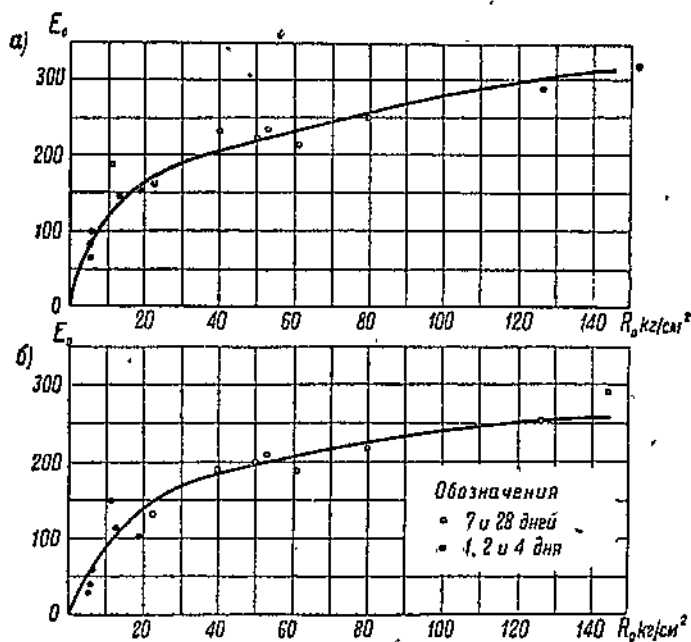


Рис. 18. Зависимость модуля упругости (в тыс. кг/см^2) от допускаемого напряжения.

а — модуль по упругим деформациям; б — модуль по полным деформациям.

чески можно считать, что величина E_0 будет вполне определенной для данной прочности бетона в рассматриваемых возрастах, каким бы путем она ни была достигнута.

Кроме того, по характеру линий, выражающих зависимость модуля упругости от напряжения (рис. 18), можно высказывать предположение, что начиная с определенной прочности бетона модуль упругости весьма мало увеличивается.

9. Коэффициент Пуассона для бетона при сжатии

Параллельно с испытаниями бетона для определения модуля нормальной упругости при сжатии нами были произведены опыты по определению коэффициента Пуассона для бетона.

Испытанию подвергался бетон с расходом цемента в 300 кг/м^3 при $B/C = 0,65$ по весу, что соответствовало пластичной консистенции бетона при его изготовлении. Возраст бетона при испытании — 30 дней. Активность цемента, применявшегося в бетоне, — 239 кг/см^2 .

В результате измерений определена следующая величина коэффициента Пуассона, соответствующая напряжению бетона, равному $R_0 = R_{пр}$: 2,2, т. е. предельно допускаемому:

- а) по полным деформациям $\mu = 0,18$,
- б) по упругим деформациям $\mu = 0,14$.

10. Выводы

Обобщая рассмотренные выше выводы о механических свойствах бетона как в раннем возрасте, так и в более позднем (28-дневном), приходим к нижеследующему заключению: бетоны в первые 1—2 дня твердения чрезвычайно слабо сопротивляются действию нагрузки; в некоторых случаях они в состоянии выдерживать только собственный вес, за исключением, конечно, бетонов на глиноземистом цементе.

Бетоны, оказывая слабое сопротивление действию нагрузки, сильно деформируются, так что в отдельных опытах не представилось возможным вычислить модуль упругости.

Остановившись на отдельных видах испытаний бетонов, отметим наиболее характерные результаты исследования.

Сопротивление бетона сжатию. 1. Временное сопротивление бетона сжатию в первые дни твердения (1—2 дня) в сравнении с 28-дневной его прочностью в среднем составляет 3—13%, а в 14-дневном 60—80%. Для всех испытанных бетонов средние значения коэффициентов прочности приводятся в табл. 15.

Таблица 15

Возраст	Коэффициенты прочности α с изменением возраста бетона в %				
	Крупный заполнитель				
	Щебень	Гравий			
	Портланд-цемент 380 кг/см ²	Портланд-цемент 380 кг/см ²	Портланд-цемент 195 кг/см ²	Пуццолановый цемент 265 кг/см ²	Глиноземистый цемент 618 кг/см ²
1 день	7	3	4	3	79
2 дня	13	9	13	8	85
4 "	36	30	28	22	78
7 дней	51	46	32	31	78
14 "	72	77	60	63	93

По данным, приведенным в табл. 15, можно считать, что применение в бетоне щебня вместо гравия увеличивает интенсивность нарастания прочности вплоть до 7-дневного возраста бетона. Из этой же таблицы видно, что замена в гравийном бетоне портланд-цемента с низкой активностью (194 кг/см^2) портланд-цементом с более высокой активностью (380 кг/см^2) в первые 1—2 дня твер-

дения вызывает лишь незначительное снижение интенсивности нарастания прочности, зато в последующие сроки твердения (4—14 дней) интенсивность нарастания прочности оказывается большей у бетона, изготовленного на цементе с более высокой активностью.

Применение в бетоне пуццоланового цемента оказало влияние на интенсивность нарастания прочности, аналогичное влиянию портланд-цемента с низкой активностью. Применение же в бетоне глиноземистого цемента показало, что коэффициент прочности α имеет почти постоянное значение, равное 80% в пределах от 1 до 7 дней. Наконец, влияние на интенсивность нарастания прочности расхода цемента и водоцементного отношения показывает, что при большом расходе цемента и малом B/C прочность растет более интенсивно, чем при малом расходе цемента и большом B/C . Так, если в однодневном возрасте при $B/C = 0,68$ и $C = 250 \text{ кг/м}^3$ прочность составляла 1% от 28-дневной, то при $B/C = 0,40$ и $C = 450 \text{ кг/м}^3$ она составляет уже 6%, а в двухдневном возрасте при тех же условиях 6 и 14%.

2. Прочность бетона при замене в нем гравия щебнем, при одинаковом расходе цемента и одинаковой степени пластичности бетонной смеси, оказывается большей в первые два дня твердения, причем увеличение прочности за счет замены гравия щебнем в первые сутки твердения составляет от 50 до 150%, в возрасте двух суток 10—20%. В последующие дни твердения гравийный бетон показал большую прочность и к 28 дням увеличение составило в среднем 17%.

3. Прочность бетона на сжатие не может быть predeterminedena при замене в нем цемента с одной активностью цементом с другой активностью при условии оценки активности цемента по современному стандарту (ОСТ 3202). Следовательно, отсутствие прямой зависимости между активностью цемента и прочностью бетона указывает на неполноценность современной методики испытания цемента.

Сопротивление бетона растяжению. 1. Коэффициенты, характеризующие интенсивность нарастания прочности на растяжение для всех испытанных бетонов (средние) приводятся в табл. 16.

Величины приведенных коэффициентов показывают, что замена в бетоне гравия щебнем замедляет интенсивность нарастания

Таблица 16

Возраст бетона	Коэффициенты прочности α_p с изменением возраста бетона в %				
	Крупный заполнитель				
	Щебень	Гравий			
	Портланд- цемент 380 кг/см ³	Портланд- цемент 380 кг/см ³	Портланд- цемент 195 кг/см ³	Пуццолановый цемент 265 кг/см ³	Глиноземистый цемент 518 кг/см ³
1 день	4	6	7	5	86
2 дня	11	14	9	10	88
4	32	45	37	28	79
7 дней	51	66	69	49	73
14	72	90	63	69	83

прочности на растяжение. В раннем возрасте (1—2 дня) нарастание менее значительно и становится более значительным, начиная с 4-дневного возраста (при сжатии, как приведено выше, бетон на щебне имеет большие коэффициенты, чем бетон на гравии).

2. Влияние активности цемента на приращение прочности бетона со временем при замене в нем портланд-цемента с низкой активностью (195 кг/см^2) портланд-цементом с более высокой активностью (380 кг/см^2) практически имеет малое значение до 7-дневного возраста. При применении в бетоне пуццоланового цемента интенсивность нарастания оказывается меньшей, чем у бетона на портланд-цементе (особенно в сравнении с портланд-цементом с активностью 380 кг/см^2). Глиноземистый бетон, как в первые дни твердения, так и в последующие (до 7-дневного возраста), имеет почти одинаковые коэффициенты прочности, близкие к 80%.

3. Существенное влияние на интенсивность нарастания прочности оказывает увеличение расхода цемента и уменьшение B/C .

4. Прочность бетона на разрыв при замене в нем гравия щебнем уменьшается в раннем возрасте и увеличивается примерно на 15% в 28-дневном.

5. Прочность бетона на разрыв не повышается соответственно повышению активности цемента, а, как правило, повышение этой прочности происходит в меньшей степени, чем повышение активности. Сопротивление бетона разрыву изменяется почти пропорционально «активности цемента по растяжению», т. е. сопротивлению стандартного раствора на разрыв. Некоторое исключение из этого правила составляет глиноземистый цемент.

6. Прочность бетона на растяжение в сравнении с прочностью на сжатие в среднем для всех бетонов, за исключением глиноземистого, составляет около 10%, для глиноземистого же — всего 4%.

Скалывание бетона. 1. Временное сопротивление скалыванию по отношению к временным сопротивлениям сжатию и растяжению занимает промежуточное положение. Эта характеристика бетона в 3—5 раз меньше временного сопротивления сжатию и в 2—4 раза больше временного сопротивления растяжению.

2. Величина временного сопротивления скалыванию составляет следующие доли этого же временного сопротивления в 28-дневном возрасте:

В возрасте бетона 1 день	40%
„ „ „ 2 дня	150%
„ „ „ 4 „ „	440%
„ „ „ 7 дней	550%

Как видно из приведенных коэффициентов, прочность на скалывание растет с увеличением возраста несколько интенсивнее, чем прочность такого же бетона на сжатие (см. табл. 15).

Сцепление бетона с арматурой. 1. Удельная величина сцепления бетона с арматурой, с изменением составляющих бетона и возраста, меняется аналогично основным видам сопротивления бетона (сжатию и растяжению). В сравнении с сопротивлением сжатию удель-

ная величина сцепления бетона с арматурой в 3—5 раз меньше; в среднем она весьма близка к величине временного сопротивления бетона скалыванию.

2. Изменение удельной величины сцепления с изменением возраста бетона и в этом случае можно характеризовать коэффициентами интенсивности нарастания удельной величины сцепления α_{cu} :

Возраст бетона	— 1 день	...	6%
"	" 2 дня	...	14%
"	" 4 "	...	40%
"	" 7 дней	...	59%

Сцепление бетона с бетоном. Испытание сцепления бетона с бетоном показало, что по мере увеличения срока перерыва в бетонировании сопротивление растяжению бетона в образце нарастает интенсивнее, нежели сила сцепления его со старым бетоном.

Кроме того следует отметить все же, что и при длительном (до 28 дней) перерыве в бетонировании сила сцепления нового бетона со старым значительна и даже в худшем случае оказывается ниже временного сопротивления бетона (нового) разрыву не более, как на 30—35%. При кратковременном перерыве (до 1—2 суток) разница в этих величинах не превосходит 10—15%.

Упругие свойства при сжатии. 1. Упругие свойства бетона, характеризующиеся модулями упругости, в зависимости от напряжения в бетоне изменяются, причем чем больше напряжение, при котором измерены деформации, тем меньше E .

2. Величины E_0 , вычисленные при допустимом напряженном состоянии бетона, зависят от «конечной» прочности бетона. С увеличением последней E_0 увеличивается, но в меньшей степени, нежели увеличилась прочность.

По характеру линии, выражающей зависимость «модуль упругости» — «напряжение» (рис. 18), видно, что модуль упругости, соответствующий допустимому напряжению, начиная с некоторой определенной прочности бетона для рассмотренных возрастов его, практически становится величиной постоянной.

3. Коэффициент Пуассона при сжатии бетона с расходом цемента в 300 кг/м^3 при $B/C = 0,65$ оказался равным: по полным деформациям — 0,18, по упругим деформациям — 0,14.

Доц. А. В. САТАЛКИН

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА

1. Введение

Ползучестью бетона принято называть пластические деформации бетона под нагрузкой, действующей на него длительное время. Характерно, что ползучесть имеет место при любых напряжениях, и даже таких, какие при кратковременной нагрузке могли бы вызывать лишь упругие деформации.

Повидимому, впервые явление ползучести обнаружил американский профессор Хэтт (*W. K. Hatt*), описавший в 1907 г. свои опыты с железобетонными балками. В дальнейшем вопросами ползучести занимался ряд исследователей, преимущественно в Англии и Америке, особенно с 1925 г., когда были начаты большие исследования ползучести Дэвисом (*Davis*) и Гленвиллем (*Glanville*). Большие экспериментальные работы проведены в лаборатории по испытанию материалов Брюссельского университета; они опубликованы в 1936 г. Дютроном (*Dutron*).

До последнего времени эксперименты проводились большей частью с сжатыми элементами. Здесь можно отметить большие опыты с железобетонными колоннами, проведенные, например, Американским институтом бетонов. Значительно менее изучена ползучесть при растяжении и изгибе и почти ничего не сделано для изучения ползучести при сдвиге.

Ряд авторов — Штрауб (*Straub*), Томас (*Thomas*), Шенк (*Shank*), Фрейденталь (*Freudenthal*), Росс (*Ross*) и др. — пытались дать аналитическое обобщение экспериментальных данных, вывести уравнения ползучести. Гленвиль предложил расчетную формулу, учитывающую явления ползучести при определении напряжений в бетоне и железе в сжатых колоннах. Фабер (*Faber*) предложил принимать переменное отношение модулей упругости железа и бетона, связанное с величиной ползучести бетона.

Физическая природа ползучести, по мнению Шенка, вскрыта еще недостаточно. В этом отношении следует отметить работы Лайнема (*Lynam*) и особенно Фрейсинэ (*Freyssinet*), продолженные немецким профессором Гелером (*Gehler*).

В СССР экспериментальные работы по ползучести бетона почти не проводились, если не считать исследований ползучести центрифугированного бетона, проведенных в Закавказском научно-исследовательском институте сооружений проф. Михайловым и инж. Цискрели. Большие экспериментальные работы по изучению ползучести бетона при растяжении начаты в механической лаборатории ЛИИЖТ. Характерной особенностью этих работ является изучение ползучести бетона, начиная с раннего возраста (1—2 дня).

При постановке опытов по исследованию ползучести бетона встречается ряд трудностей методологического характера, заключающихся не только в сложности получения достоверных измерений деформаций во времени, но и в трудности разграничения пластических деформаций под нагрузкой от усадочных деформаций и влияния температуры. Вопросом учета ползучести при расчете железобетонных конструкций в Советском Союзе занимались проф. Я. В. Столяров и проф. Н. А. Буданов (Харьков), проф. В. В. Михайлов (Тбилиси), проф. Г. Н. Маслов и доц. В. Л. Федоров (Ленинград).

В данной статье вопросы, связанные с ползучестью бетона, освещаются главным образом по материалам иностранных исследователей; проводимые нами исследования ползучести будут описаны в отдельной статье.

Явление ползучести бетона под нагрузкой, так же как и явление усадки бетона, вызывается главным образом изменениями, происходящими в твердеющем цементном камне.

До последнего времени, особенно после работы Фрейсинэ, явления усадки и ползучести объяснялись капиллярными явлениями, происходящими в порах бетона, которые Фрейсинэ рассматривал как систему капилляров. В зависимости от гигрометрического состояния бетона и окружающей среды могут наблюдаться явления перемещения воды к поверхности бетона и последующего испарения ее; при этом происходит уменьшение объема бетонного элемента; напротив, если влажность окружающей среды больше влажности бетона, то наблюдается набухание бетона, так как в этом случае цементный камень будет впитывать в себя воду извне. Естественно, что выделяется из бетона лишь свободная и так называемая полусвязанная вода.

Ползучесть бетона Фрейсинэ объясняет также как явление, связанное с изменением гигрометрического состояния в бетоне и происходящее в результате приложения к нему внешних сил. Фрейсинэ рассматривает бетон как псевдотвердое тело, состоящее из твердого скелета и пор, часть из которых заполнена водой, а часть — воздухом. Активными порами, с которыми связаны явления усадки и ползучести, являются поры, заполненные водой.

Фрейсинэ, используя закон Лапласа, устанавливающий зависимость между поверхностным натяжением A жидкости, капиллярным давлением π и диаметром капилляров D , связывает его с законом равновесия испарения в зависимости от давления, температуры и влажности воздуха. В общем виде для вогнутой поверхности жидкости с двумя радиусами кривизны уравнение Лапласа имеет следующий вид

$$\pi = A \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

где π — капиллярное давление, нормальное к вогнутой поверхности жидкости;

A — поверхностное натяжение, равное для воды 8 мг/мм;

r_1 и r_2 — радиусы кривизны вогнутой поверхности.

В узком капилляре для жидкости, смачивающей стенки капилляра, $r_1 = r_2 = r$, т. е. равны радиусу мениска. Тогда

$$\pi = \frac{2A}{r} = \frac{4A}{D}, \quad (2)$$

где D — диаметр капилляра.

Для промежутка с параллельными стенками

$$\pi = \frac{A}{r} = \frac{2A}{D}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что чем меньше диаметр капилляра, тем больше капиллярное давление.

¹ Смотри наши замечания о концепции Фрейсинэ, изложенные ниже.

С другой стороны, давление пара над поверхностью мениска равно давлению пара в атмосфере на уровне, находящемся на расстоянии L от свободной поверхности жидкости, как показал Кельвин.

Расстояние

$$L = \frac{\pi}{d}, \quad (4)$$

где d — плотность жидкости.

Для воды

$$L = \pi = \frac{2A}{D}. \quad (5)$$

При 15° для воды имеем

$$\pi = 1300 \ln \frac{1}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Следовательно

$$\pi = \frac{2A}{D} = 1300 \ln \frac{1}{\varepsilon}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = \frac{P}{P_{\max}}$ — от-

носительная влажность воздуха;

P — давление пара;

$P_{\max}$ — давление пара при насыщении

В капиллярах, определяемых уравнением 7, воздух будет оставаться, не испаряясь. Действительно

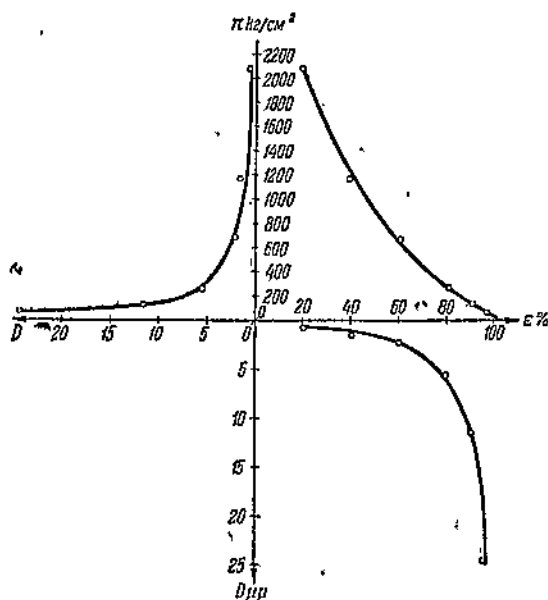


Рис. 1. Зависимость между капиллярным давлением π , диаметром капилляров D и влажностью воздуха ε .

$$D_c = \frac{2A}{1300 \ln \frac{1}{\varepsilon}}. \quad (8)$$

При $D > D_c$ вода должна испариться без усадки бетона.

При $D < D_c$ капиллярные силы будут вызывать сокращение бетона, т. е. будет иметь место усадка бетона.

Если подставить в формулу 8 частные значения, то получим следующие данные (рис. 1):

$$\begin{array}{l} \varepsilon = 20\%; 40\%; 60\%; 80\%; 90\%; 95\% \\ \pi \text{ кг/см}^2 = 2090; 1190; 665; 290; 140; 65 \\ D_{\text{мм}} = 0,76; 1,34; 2,40; 5,50; 11,40; 24,60; \end{array}$$

Здесь D выражено в миллионных долях миллиметра.

Отсюда видно, что с уменьшением относительной влажности воздуха капиллярное давление резко увеличивается, диаметр капилляра резко уменьшается, а следовательно, резко растет и усадка бетона.

На графике рис. 1 можно, по нашему мнению, найти объяснение тому «ошеломляющему»¹ факту, обнаруженному в опытах Дютрона, что влажное хранение увеличивает усадку. Действительно, при переходе от насыщенной среды к обычной воздушной среде с меньшей относительной влажностью (обычно 60—70%), резко возрастает капиллярное давление; с другой стороны, при большой относительной влажности размер пор, заполненных водой, сильно возрастает, т. е. общее количество активных пор увеличивается.

Помимо влажности воздуха, большое влияние оказывает и разница температур среды и бетона.

Как видно из графика рис. 1, в бетоне, находящемся в насыщенной атмосфере, поры заполнены водой. Однако это имеет место лишь в том случае, если температура бетона равна температуре среды или ниже ее. Если же температура бетона выше температуры среды, то изменяется гигрометрическое состояние, так как давление пара изменяется с изменением температуры.

Если t и T — температуры среды и бетона, а H_t и H_T — соответствующие давления пара, то вода будет испаряться из всех пор, имеющих температуру больше, чем

$$D = \frac{2A}{1300 \ln \frac{1}{H_t H_T}}.$$

Такое явление происходит за счет экзотермии бетона, когда температура бетона выше температуры среды и он начинает терять воду, введенную в него при затворении. Твердение протекает при этом быстрее, ускоряясь с увеличением размера пор. Более плотные бетоны теряют воду медленнее и в меньших количествах.

Особенно отчетливы эти явления, например, при электропрогреве бетона, причем чем пористее бетон и чем он больше содержит воды, тем скорее происходит испарение воды и высыхание бетона. Испарение может быть настолько большим, что воды нехватит для дальнейшей гидратации цемента. Этим объясняется известное замедление твердения бетона после электропрогрева, проявляющееся тем резче, чем пористее бетон и чем в нем больше воды.

Концепция Фрейсинэ подверглась критике при его докладе на конгрессе в Швеции. Ряд выступавших указывал на известную односторонность положений Фрейсинэ, на игнорирование им поверхностных явлений в системе воздух — твердое тело, наряду с выдвижением на первый план исключительно капиллярных явлений в порах, заполненных водой. Не вдаваясь здесь в подробную критику идей Фрейсинэ по их существу, отметим, что, по нашему мнению, капиллярные явления играют большую роль в вопросах

¹ По выражению Гелера.

усадки и ползучести и связь капиллярного давления с влажностью воздуха неоспорима (уравнение 6).

С нашей точки зрения, сомнительной является связь капиллярного давления с диаметром капилляра, при этом не самое уравнение Лапласа, связывающее капиллярное давление с радиусом мениска, а возможность рассмотрения пор в бетоне как системы правильных капилляров разных размеров, пронизывающих тело бетона в разных направлениях. Поры в бетоне безусловно не являются правильными капиллярами, имеющими форму промежутка с параллельными стенками, а не форму трубки определенного диаметра или какую-нибудь другую форму. От принятия той или иной формы капилляра зависят значение капиллярных сил и дальнейшие рассуждения Фрейсинэ.

Достаточно сравнить уравнения 2 и 3, приведенные выше, чтобы убедиться в возможной ошибке при принятии той или иной условной конфигурации сечения капилляра. Поэтому в приведенной таблице Фрейсинэ, графически изображенной на рис. 1, важны не точные значения приведенных там величин, а характер связи между капиллярным давлением, влажностью воздуха и размерами капилляров, вернее радиусов менисков, в порах бетона. С этой оговоркой мы соглашаемся с мнением Фрейсинэ о значительной роли капиллярных явлений в вопросах усадки и ползучести бетона; но вопрос не может быть сведен только к капиллярным явлениям.

В нашем распоряжении пока не имеется другой теоретической концепции, которая полностью отвергала бы идеи Фрейсинэ и вернее объясняла интересующие нас явления в бетоне. Безусловно важную роль в данном случае играют и сорбционные электрохимические силы, которым за последнее время уделяют много внимания при изучении явлений, происходящих в грунтах, — системах, в известной мере аналогичных бетону.

Переходя к ползучести, следует отметить более сложную физическую сущность этого явления, внешне родственного усадке.

Внешней причиной ползучести является нагрузка, прилагаемая к бетону либо в виде внешней силы, либо в виде усадочных или температурных напряжений. Значительную роль играют в данном случае капиллярные явления, но имеет место и вязкое течение частиц бетона одна за другой, главным образом в коллоидных составляющих цементного камня. В первое время, кроме этого, имеется и кристаллическое течение в кристаллическом остоле цементного камня. Заполнители и арматура влияют на развитие явления ползучести.

Попытаемся разобрать эти стороны явления ползучести.

Прежде всего следует указать, что в данном случае к капиллярным силам, вызывающим усадку, присоединяется дополнительное действие местной нагрузки. Помимо дополнительных деформаций, вызываемых этой внешней силой, происходит непрерывное изменение гигрометрического состояния бетона, так как изменяются радиусы менисков r , капиллярное давление π , а это в свою очередь изменяет усадочные деформации бетона, находящегося под нагрузкой. Так как скорость движения воды по капиллярам мала, то процесс протекает длительное время.

В свете сказанного следует признать ошибочным обычный метод определения пластических деформаций под нагрузкой как разницы полных деформаций нагруженного бетона и усадочных деформаций ненагруженных образцов, во всем остальном идентичных с нагруженными. На самом деле усадка нагруженных и ненагруженных образцов неодинакова; разница в усадке сказывается тем резче, чем моложе бетон, ибо совершенно очевидно, что при слабых по прочности стенках капилляров всякое изменение капиллярного давления будет сильнее отражаться на молодом бетоне, чем на бетоне зрелого возраста при одинаковых размерах капилляров. Известно, что усадка бетона в раннем возрасте относительно больше и что скорость усадки со временем уменьшается.

Сказанное отнюдь не противоречит закону, отмечаемому проф. Гелером, что чем прочнее бетон, тем больше усадка. Этот закон может показаться парадоксальным, но дело в том, что его надо понимать лишь в том смысле, что законы изменения со временем прочности бетона и усадки одинаковы, т. е. кривые твердения бетона и усадки бетона со временем аналогичны.

Отмеченная нами ошибка в оценке ползучести, как разности полных и усадочных деформаций, будет иметь разный знак при сжатии и растяжении. Если при сжатии деформации ползучести увеличивают усадку, то при растяжении происходит обратное действие. Лишь в первые дни твердения бетона деформации ползучести и усадки совпадают, поскольку в первые дни бетон при усадке не уменьшается, а увеличивается в объеме из-за влияния экзотермии.

Указанная ошибка при нахождении деформаций ползучести является одной из причин обнаруженного в наших опытах по изучению ползучести при растяжении «странныго» явления спада кривой ползучести через несколько дней нахождения бетона под нагрузкой с последующим ростом деформаций со временем. Это явление с увеличением возраста бетона постепенно сглаживается к моменту нагружения.

Таким образом одной из причин ползучести являются капиллярные явления в бетоне, связанные с обезвоживанием гелей. Многие авторы признают также наличие кристаллического течения в бетоне, вызываемое камневидными составляющими. Основанием для подобного утверждения является отмеченный в опытах Дэвиса факт различия ползучести в бетоне на разных заполнителях, приводимый нами ниже.

Мы склонны рассматривать влияние заполнителей не столько с точки зрения их собственной ползучести, сколько в том отношении, что различный минералогический состав и вид заполнителей проявляется в различной форме и модуле поверхности, в различной их адсорбционной способности, а все это изменяет содержание воды и структуру коллоидных частей цементного камня, структуру гелей и электрохимические сорбционные силы. Вместе с тем влияние заполнителей можно оценивать по аналогии с арматурой.

Некоторые авторы¹ отмечают и вязкое течение в бетоне как в

¹ Например, доцент В. Л. Федоров.

смоле, т. е. движение частиц одна по другой; подтверждением этого явления, по их мнению, служат поперечные деформации при ползучести. Сами по себе поперечные деформации не являются неожиданными, ибо и при усадке и при ползучести неизбежны деформации во всех направлениях хотя бы потому, что капилляры в бетоне не ориентированы строго в одном направлении, а расположены более или менее хаотично. Независимо от этого вязкое течение бетона, по нашему мнению, безусловно имеет место, особенно в молодом возрасте.

В заключение рассмотрения физической сущности ползучести нам хочется отметить, что ползучесть является также следствием структурных изменений в цементном камне. С этой стороны явления усадки и ползучести еще не рассматривались, но мы полагаем, что изменения, происходящие в структуре цементного камня, безусловно влияют на усадку и ползучесть бетона. Многие исследователи, в том числе и академик А. А. Байков, указывали на наличие в

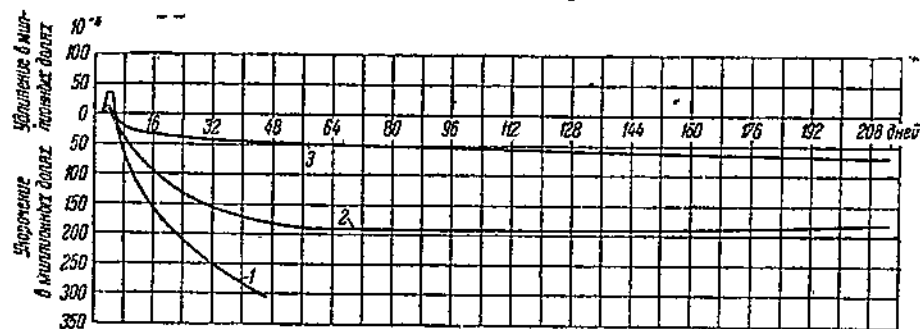


Рис. 2. Суммарные деформации бетона при растяжении на единицу напряжения ($\mu\text{г}/\text{см}^2$).

Расход цемента $450 \text{ кг}/\text{м}^3$; $B/C = 0,40$; $R = 0,5 \sigma_g$; 1 — возраст бетона 1 день, $\sigma_g = 0,9 \text{ кг}/\text{см}^2$; 2 — возраст бетона 2 дня, $\sigma_g = 2,4 \text{ кг}/\text{см}^2$; 3 — возраст бетона 3 дня, $\sigma_g = 3,5 \text{ кг}/\text{см}^2$.

цементном камне как кристаллических, так и коллоидных продуктов реакций цемента с водой. Термин проф. В. Н. Юнга «микробетон» тоже по существу подчеркивает анизотропность цементного камня. Но особенно наглядно и доказательно, с нашей точки зрения, различие структур даже в таком, казалось бы определенном, вяжущем веществе, каким является портланд-цемент; оно выявлено в обобщении, сделанном А. Е. Шейкиным, установившим наличие в основном трех структур цементного камня: 1) макрокристаллической, 2) условно-коллоидной и 3) субмикрокристаллической, т. е. с преобладанием кристаллических или коллоидных образований в цементном камне. А. Е. Шейкин показал влияние структур на прочность и высказал некоторые замечания о влиянии структуры цементного камня на другие его свойства.

Мы уверены, что и ползучесть бетона находится в зависимости от этого нового фактора, и необходимо продолжить изучение ползучести бетона на разных цементах под этим углом зрения. Помимо того, что цементный камень, полученный из разных цементов, бу-

дет иметь ту или иную структуру с преобладанием кристаллических продуктов гидратации или гелей, следует иметь в виду, что для каждого данного цемента структура цементного камня не является стабильной. По мере твердения структура может изменяться; дополнительным фактором, влияющим на изменения структуры цементного камня, может служить дополнительная внешняя нагрузка. Возможно, что в этом кроется вторая причина отмеченного уже нашими опытами «странныго» изменения пластических деформаций бетона при растяжении его в молодом возрасте.

Эти вопросы служат предметом наших исследований ползучести, проводимых в данное время. Количественные показатели ползучести бетона приводятся ниже. Здесь лишь отметим, что деформации ползучести значительно ниже усадочных деформаций даже для бетона зрелого возраста.

В наших опытах по исследованию ползучести при растяжении это наглядно выявляется по наблюдаемому сокращению образцов под нагрузкой вскоре после ее приложения. Особенно это заметно на бетоне молодого возраста. Кривая суммарных деформаций через несколько дней переходит через ось абсцисс, меняя знак и наглядно доказывая значительно большие деформации усадки по сравнению с деформациями ползучести (рис. 2).

3. Положительная и отрицательная роль ползучести в бетонных и железобетонных сооружениях

Ползучесть бетона может играть положительную и отрицательную роль в различных сооружениях.

В массивных бетонных сооружениях ползучесть бетона полезна, особенно на первых порах службы сооружения. В железобетонных конструкциях влияние ползучести не однозначно. Оно зависит от назначения и условий работы конструкций (сжатие, изгиб), от конфигурации (плита, балка большой высоты), от степени и характера армирования (малое, большое, напряженное армирование).

В бетонных массивных сооружениях крайне нежелательны температурные и усадочные напряжения, являющиеся причиной появления трещин, особенно при охлаждении массива, так как в наружных слоях массива появляются растягивающие напряжения, которые, по некоторым данным, могут достигать величин порядка 25—40 кг/см². Бетон же, как известно, имеет сравнительно небольшую прочность на растяжение. Ползучесть бетона в данном случае будет уменьшать растягивающие напряжения. Следует, однако, иметь в виду, что ползучесть в массивных сооружениях численно значительно меньше, чем в лабораторных образцах малого размера. Тем не менее наблюдения над сооружениями показывают, что трещины появляются там, где бетон имел малую ползучесть и, наоборот, отсутствуют там, где бетон обладал большой ползучестью наряду с меньшей экзотермией (низкотермичный цемент).

В сжатых железобетонных колоннах ползучесть вызывает дополнительные напряжения в арматуре и уменьшает сжимающие напряжения в бетоне. Это происходит из-за наличия сцепления железа с бетоном. В незагруженных железобетонных колоннах такое же изменение в напряжениях железа и бетона вызывает усадка бетона.

В качестве примера приводим результаты опытов Дэвиса с железобетонными колоннами¹ (табл. 1).

Таблица 1

Напряжения в железобетонных колоннах

№ по порядку	Временное сопротивление бетона сжатию в 28-дневном возрасте кг/см^2	Процент армирования	Общая нагрузка на колонны кг	Напряжения в кг/см^2							
				В момент приложения нагрузки		Выдерживание под нагрузкой					
						1 год		3 года		5½ лет	
				железо	бетон	железо	бетон	железо	бетон	железо	бетон

Колонны, твердевшие на воздухе с 50% влажностью при $t = 21^\circ$

1	140	5,0	10035	675	61,25	1883	-1,4	1920	-3,5	1960	-5,2
2	140	1,9	6400	458	42,70	2420	4,2	250	3,15	2600	1,05
3	280	1,9	9800	550	68,20	2630	27,65	2830	23,80	2920	22,0

Колонны, твердевшие под водой при $t = 21^\circ$

1	140	5,0	8650	494	56,5	704	46,5	755	43,5	798	42
2	140	1,9	6150	394	42	560	39	634	37,5	665	37
3	280	1,9	9300	512	65	740	60,5	815	59	848	59

Примечание. Знак — указывает растягивающее напряжение.

Характеристика бетонов: бетоны 1 и 2: $B/C = 0,83$; состав, 1 : 8,40; бетон 3: $B/C = 0,53$; состав 1 : 4,80.

По данным табл. 1 нами построен график изменения напряжений в железе и бетоне за время нахождения под нагрузкой (рис. 3), причем напряжения пересчитаны в кг/см^2 .

Как видно из опытов Дэвиса, на изменение напряжений существенное влияние оказывает среда твердения. За время нахождения под нагрузкой колонн, твердевших на воздухе, напряжения в арматуре возросли более чем в 5 раз при слабом армировании и примерно в 3 раза при сильном армировании. Вместе с тем напряжения в бетоне понизились при слабом армировании в 40 раз, а при сильном армировании более чем в 100 раз и даже изменили знак: в бетоне появились растягивающие напряжения порядка 5 кг/см^2 в возрасте 5½ лет. При твердении в воде произошли значительно меньшие изменения напряжений железа и бетона. Напряжения в арматуре возросли примерно в 1½ раза, причем жирность бетона и процент армирования почти не сказались на изменении напряжений в железе. В данном случае сказались значительно меньшая ползучесть бетона в воде, где наблюдается даже разбухание бетона. Напряжения в бетоне в этом случае уменьшились примерно на 40% при сильном и на 13% при слабом армировании, а при более жирном бетоне — на 10%.

Как общий вывод, следует отметить, что наиболее значительные изменения напряжений в железе и бетоне, вне зависимости от

¹ Proceedings of the American Society for Testing Materials, 1937, v. 3, p. II, p. 320.

среды твердения, произошли за первый год нахождения колонн под нагрузкой. Достаточно сказать, что за период от одного года до 5½ лет напряжения в арматуре повысились лишь на 10%. На много уменьшились за этот же период и напряжения в бетоне.

Аналогичная картина получилась и в опытах Американского института бетона и в опытах Гленвилля и Дютрона. По опытам последнего напряжения в арматуре за 900 дней выдерживания колонн под нагрузкой увеличилось в 2,1—3 раза при твердении на воздухе; несколько меньшие напряжения повысились при твердении в воде. Характерно отметить, что максимальное увеличение напряжений (4,1—5,0 раз) имело место при первоначальном хранении в воде (2 месяца), а затем на воздухе; минимальное увеличение напряжений (1,6—2,1 раза) —

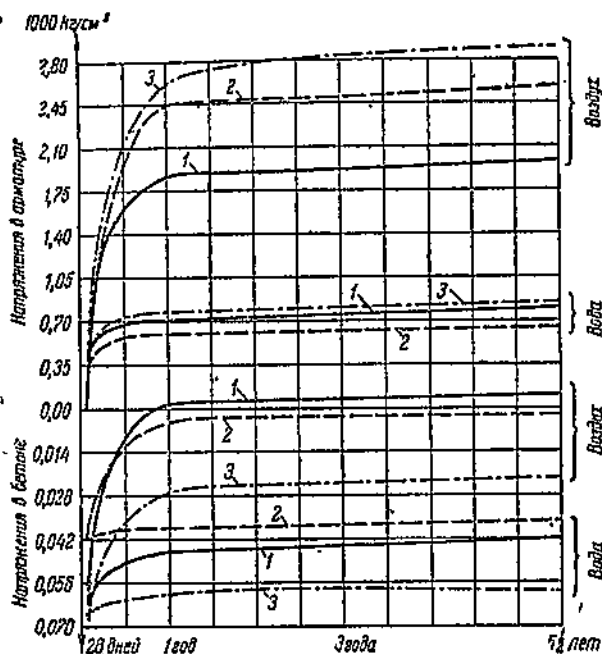


Рис. 3. Изменение напряжений в железе и бетоне в нагруженных колоннах.

1 — бетон состава 1:8,4, арматура 5%; 2 — бетон состава 1:8,4, арматура 1,9%; 3 — бетон состава 1:4,8, арматура 1,9%.

при обратном порядке твердения. Соответственно этому напряжения в бетоне понизились, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Напряжения в бетоне через 900 дней (σ_{900}) по отношению к начальным напряжениям ($\sigma_{нач}$)

Условия твердения колонн	Вид бетона	$\sigma_{900} : \sigma_{нач}$
На воздухе	I ²	0,50—0,75
На воздухе	II ²	0,60—0,82
Под водой	I	0,78—0,91
Под водой	II	0,82—0,93
2 месяца в воде, 7 месяцев на воздухе	I	0,45—0,50
2 месяца на воздухе, 7 месяцев в воде	I	0,80—0,85

¹ Annales de Travaux Publics de Belgique, 1936 и 1937.

² Бетон I: весовой состав: цемент 16,6%; высевки (каменная пыль) 0—2 мм — 29,4%; галька порфировая 5—20 мм — 54%; воды — 11,5% от веса сухих материалов; расход цемента — 341 кг/м³ бетона. Бетон II: гравий рейнский 5—30 мм — 61,3%; песок 0—3 мм — 25,3%; цемент — 13,4%; воды — 7,5%; расход цемента 341 кг/м³.

Как видно из табл. 2, минимальное снижение напряжений имело место при твердении под водой, а максимальное — при комбинированном твердении с первоначальным твердением в воде.

В известной степени на снижении напряжений в бетоне и повышении напряжений в арматуре сказывается возраст бетона к моменту нагружения (чем моложе бетон, тем больше изменения напряжений, так как больше ползучесть), а также вид бетона.

Характерно отметить, что практически ползучесть бетона не влияет на конечную прочность железобетонных колонн. Это подтвердилось опытами Гленвилля, Дютрона и других. Опыты Дэвиса показали, что имеется даже некоторое повышение прочности бетона на сжатие и модуля упругости E_c . Указанное¹ видно из табл. 3.

Таблица 3

Влияние длительного выдерживания под нагрузкой на прочность бетона при сжатии

Время выдерживания под нагрузкой	Хранение	Временное сопротивление сжатию в кг/см ²			
		бетон состава 1:3,6		бетон состава 1:6,3	
		нагружен	не нагружен	нагружен	не нагружен
5 мес.	На воздухе	375	359	229	228
5 мес.	В воде	438	424	243	250
12 мес.	На воздухе	366	335	247	243
12 мес.	В воде	417	406	296	292

Повышение прочности на сжатие для бетона, нагруженного в суточном возрасте, подтвердилось также нашими опытами.² Наши опыты с ползучестью при растяжении, а также опыты Шлезера, Графа и Абрамса (Schleser, Graf, Abrams) при всестороннем сжатии не показали влияния выдерживания под нагрузкой на прочность бетона.

Во внецентренно-сжатых колоннах усадка и ползучесть несколько разгружают растянутую арматуру, но зато вызывают дополнительные напряжения в сжатой арматуре.

Вопросом учета ползучести и усадки при расчете внецентренно-сжатых колонн занимались проф. Столяров,³ инж. Фрейденталь⁴ и другие. Последний указал на возможность экономии железа в растянутой арматуре за счет ползучести, оценивая эту экономию в 40%. Однако, как это было показано в откликах на эту статью Винценца и Бонатца⁵ (Winzenz, Bonatz), это утверждение является ошибочным. Если внести поправки в ошибочные подсчеты Фрей-

¹ Промстройпроект. Справочник проектировщика промышленных сооружений, т. IV, статья проф. Нилендера, ОНТИ, 1935.

² Я. Е. Иохельсон, Н. Г. Корсак, А. В. Саталкин, П. В. Тарасов, Физико-механические свойства бетона (статья А. В. Саталкина), Госстройиздат, 1939.

³ Я. В. Столяров, Теория железобетона на экспериментальной основе, 1934.

⁴ Стройиндустрия, № 3, 1936.

⁵ Beton und Eisen, № 12, стр. 210, 1936.

денталия, то экономия на растянутой арматуре окажется небольшой (до 10%), но в то же время сильно возрастают напряжения в сжатой арматуре.

В железобетонных балках, как показывают опыты Гленвилля, Американского института бетона, Дютрона и других исследовате-

лей, сильно возрастают прогибы при выдерживании балок под нагрузкой, а напряжения в бетоне и арматуре перераспределяются.

На рис. 4 представлен для примера график изменения прогибов балки с одиночной и двойной арматурой. Как видно из табл. 4, прогибы балок возрастают, причем в балках с одиночной арматурой больше, чем в балках с двойной арматурой. Это можно объяснить меньшей ползучестью бетона в сжатой зоне под влиянием сжатой арматуры.

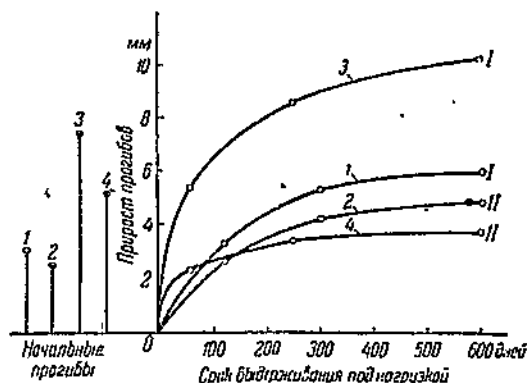


Рис. 4. Изменение прогиба железобетонных балок под нагрузкой со временем.

1 — простая арматура, 120 дней, $P = 320$ кг; 2 — простая арматура, 140 дней, $P = 320$ кг; 3 — двойная арматура, 60 дней, $P = 265$ кг; 4 — двойная арматура, 70 дней, $P = 250$ кг.

Прогибы балок в воде составляли лишь 25—45% от прогиба балок, твердевших на воздухе.

Напряжения в бетоне балок, так же как и в колоннах, под влиянием ползучести уменьшаются, а в арматуре увеличиваются, однако, численно изменение напряжений в балках меньше, чем в колоннах.

Дютрон отмечает, что в балках с двойной арматурой сильно увеличиваются напряжения в сжатой арматуре, в 2,2—2,85 раза при твердении на воздухе.

При учете сжатия от усадки в опытах Дютрона напряжение в сжатой арматуре балок доходило до значения 22—23,5 кг/мм²; т. е. было весьма близко к пределу упругости. Опыты Дютрона с балками, твердевшими в переменных условиях, показывают, что предварительное твердение в воде желательно, ибо при последующем твердении под нагрузкой на воздухе напряжения в арматуре, сжатой и растянутой, меняются мало и в этом случае угрозы образования трещин меньше, чем при твердении на воздухе.

Прогибы балок

Таблица 4

Срок твердения	Условия твердения	Отношение прогибов — конечного к первоначальному	
		в балках с оди- ночной арматурой	в балках с двойной арматурой
600 дней	Воздух	2,9	1,8—2,3
250 дней	Воздух	1,7	1,4

Испытание балок, доведенное до разрушения, показало, что упругие свойства и разрушающие нагрузки балок, твердевших под нагрузкой и без нагрузки, примерно одинаковы. Поэтому нет оснований ожидать какого-либо изменения коэффициента безопасности железобетонных балок под влиянием ползучести.

Если ползучесть не сказывается на конечной прочности бетона, то она сказывается благоприятно на увеличении напряжений, при котором трещины появляются. Трещины в железобетонных балках в значительной степени зависят от усадки, причем, если последняя очень велика, то возможно появление трещин при твердении бетона еще до нагрузки вследствие значительных растягивающих напряжений в бетоне. Из-за сцепления железа с бетоном арматура препятствует усадке бетона, уменьшая ее величину и вызывая вместе с тем растягивающие напряжения в бетоне. При отсутствии усадки эти напряжения не возникли бы. Если до нагружения трещины еще не появились, то достаточно небольшой нагрузки, чтобы в дополнение к растягивающим напряжениям от усадки появились напряжения от нагрузки и образовались трещины. При наличии ползучести бетона при растяжении напряжения в бетоне уменьшатся, а в арматуре возрастут. Возможно, что трещины в бетоне появятся при более высокой нагрузке. Однако до сих пор это еще не доказано.

Следует заметить, что в ненагруженном армированном бетоне, находящемся в напряженном состоянии, также появляется ползучесть за счет имеющихся в бетоне растягивающих напряжений, как это указано выше. Если трещины в бетоне имелись до нагружения, то ползучесть, напротив, будет способствовать их дальнейшему развитию. Это объясняется тем, что из-за ползучести бетона в сжатой зоне, напряжения в растянутой арматуре увеличиваются; кроме того, как утверждает Томас,¹ трещины увеличиваются благодаря ползучести бетона в работе последнего на сцепление, вследствие чего увеличивается скольжение бетона вдоль арматуры.

Для предохранения от трещин необходимо применение бетона с весьма малой усадкой и, главным образом, применение напряженной арматуры. Но следует иметь в виду, что эффективность напряженного армирования уменьшается из-за ползучести бетона.

В арочных мостах ползучесть бетона, вызывая прогиб и меняя ось арки, заметно изменяет напряженное состояние.

Необходимо признать, что в отношении учета влияния ползучести на напряженное состояние в бетонных и железобетонных конструкциях и на появление трещин в растянутой зоне, сделано еще далеко не все.

Не приводя здесь и не анализируя всех расчетных формул с учетом ползучести, надо отметить их условность из-за трудности учета всех факторов, от которых зависит ползучесть. Помимо этого уравнения ползучести, приводимые ниже, не учитывают того, что

¹ Thomas, Structural Engineer № 7, 1936, стр. 298; реферат в Стройиндустрии, № 11, 1936.

изменяя напряженное состояние, ползучесть и сама уменьшается.

Наши опыты по ползучести бетона в раннем возрасте указывают некоторые особенности и значительно большую величину ползучести бетона при растяжении. Так как напряженное состояние в массивных бетонных и железобетонных конструкциях создается по существу почти сразу после схватывания цемента, хотя бы из-за усадки и температурных явлений, то ползучесть бетона должна внести значительные изменения в это начальное напряженное состояние. Это повлечет за собой внесение существенных изменений в применяемые расчетные формулы.

4. Факторы, влияющие на ползучесть бетона

На ползучесть бетона оказывает влияние ряд факторов, связанных с характеристиками бетона: видом и качеством цемента, водоцементным отношением, расходом цемента, консистенцией, видом и гранулометрией заполнителей, величиной и характером нагрузки, возрастом бетона к началу загрузки, а следовательно его прочностью и модулем упругости и, наконец, с производственными условиями, методами укладки и условиями твердения бетона. Так как ползучесть объясняется в значительной степени капиллярными явлениями в бетоне, то численные показатели ползучести зависят, помимо всего прочего, от размеров образца, на котором ползучесть определяется. Наконец, величина ползучести бетона при прочих равных условиях изменяется введением в бетон арматуры.

Ниже освещается влияние различных факторов на ползучесть бетона на основе ряда исследований. Однако вследствие разницы в методике опытов, различий в материалах и из-за других причин, непосредственное количественное влияние выявить не удастся, а можно лишь подметить качественную сторону вопроса.

а) Влияние вида и качества цемента

Вид и качество цемента должны безусловно оказывать влияние на величину и характер изменения ползучести бетона. Однако сейчас еще нет достаточной ясности в этом вопросе, ибо имеющиеся опытные данные противоречивы, как это имеет место и в опытных данных по усадке бетона, представляющей собой явление, родственное ползучести по природе деформаций.

Лайнем указывает, что из четырех цементах: глиноземистого, быстротвердеющего портланд-цемента, нормального портланд-цемента и шлако-портланд-цемента — наименьшей ползучестью обладает глиноземистый цемент, а наибольшей — шлако-портланд-цемент. На рис. 5 нами построены кривые ползучести бетона на разных цементах по формуле Шенка. По опытам Дэвиса ползучесть бетона на низкотермичном цементе больше, чем на нормальном цементе при одинаковой удельной поверхности (рис. 6). Как видно из графика рис. 6, ползучесть бетона на низкотермичном цементе почти в 2 раза больше, чем на нормальном портланд-цементе.

Нормальный портланд-цемент — алитовый, он содержит 51% 3CaOSiO_2 и 6% $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$; низкотермичный цемент — белитовый, он содержит 26% 3CaOSiO_2 и 6% $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$. Из приведенных данных следует, что быстротвердеющий портланд-цемент дает меньшую ползучесть, чем нормальный портланд-цемент, тогда как родственная ползучести усадка, по ряду данных, у высокосортных цементов выше, чем у нормальных.

На рис. 7 приведены данные о ползучести бетона на цементах разной тонкости помола.

Цементы имеют удельные поверхности 1300 и 2200 см^2 . Из рис. 7 следует, что у низкотермичного цемента ползучесть увеличивается с крупностью частиц, а у нормального портланд-цемента уменьшается. Такое явление не вполне понятно, но тем не менее важно отметить следующее. В старых американских сооружениях, где применялись низкотермичные цементы крупного помола, нет трещин, так же как и в недавно построенной на низкотермичном цементе плотине Morris (Дэвис). С другой стороны там, где в массивных сооружениях применялся портланд-цемент сравнительно тонкого помола, наблюдались трещины.

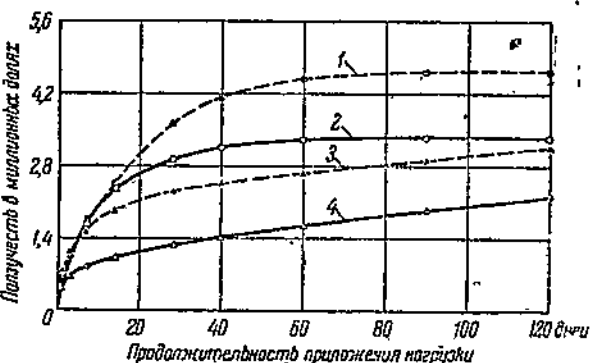


Рис. 6. Ползучесть бетона, приготовленного на разных цементах (по Дэвису).

1 — низкотермичный цемент, растяжение; 2 — нормальный портланд-цемент, растяжение; 3 — низкотермичный цемент, сжатие; 4 — нормальный портланд-цемент, сжатие.

тичных или близких по составу и по В/Ц, приготовленных на двух цементах, при численно одинаковой нагрузке. Следовало бы сравнивать различные бетоны при одинаковом напряженном состоянии. Так как очевидно, что активность быстротвердеющего це-

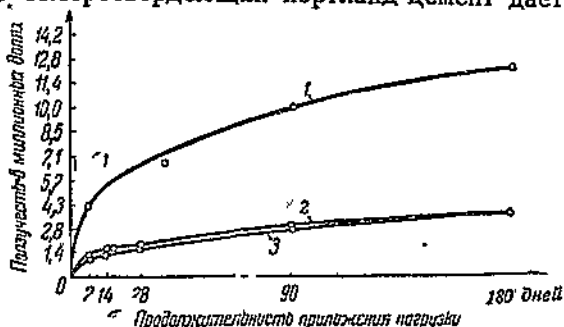


Рис. 5. Ползучесть бетона, приготовленного на разных цементах (по Шенку).

1 — нормальный портланд-цемент; 2 — высокосортный портланд-цемент; 3 — глиноземистый цемент. Возраст при нагружении 28 дней, твердение на воздухе.

К сожалению, в приводимых данных нет указаний, при каких условиях произведено сравнение ползучести бетона на разных цементах. Но рассматривая непосредственные опытные данные Дэвиса, можно предположить, что кривые, приведенные на рис. 6, отвечают ползучести бетонов иден-

мента больше, чем нормального и низкотермичного, то при одинаковом (численном) напряжении фактическая относительная напряженность была не одинаковой и это безусловно сказалось на показателях ползучести. При условии сравнения ползучести бетона на этих трех цементах при одинаковом относительном напряжении разница показателей ползучести, повидимому, уменьшилась бы.

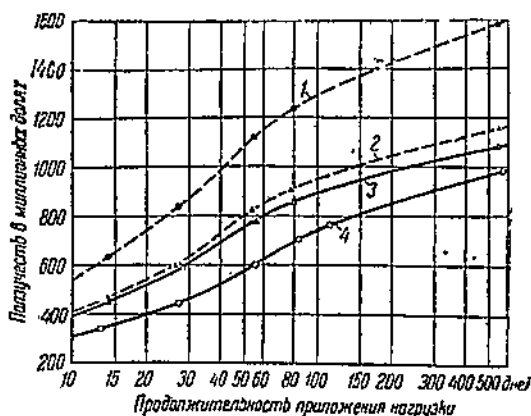


Рис. 7. Ползучесть бетона, приготовленного на цементах с разной тонкостью помола.

1 — низкотермичный цемент, удельная поверхность 1300 см²/г; 2 — низкотермичный цемент, удельная поверхность 2200 см²/г; 3 — нормальный портланд-цемент, удельная поверхность 2200 см²/г; 4 — нормальный портланд-цемент, удельная поверхность 1300 см²/г.

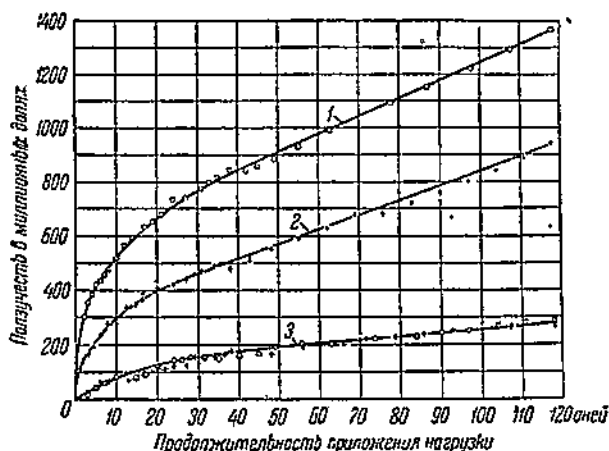


Рис. 8. Ползучесть бетона, приготовленного на разных цементах, при одинаковом относительном напряжении.

1 — шлако-портланд-цемент, $R_{e\sigma} = 179$ кг/см²; 2 — нормальный портланд-цемент; $R_{e\sigma} = 203$ кг/см²; 3 — кривая усадки для обоих цементов. Состав бетона 1:2:4; испытание на воздухе с 65% относительной влажностью, нагружение в 28-дневном возрасте, В/Ц = 0,65 (по песку), напряжение — 28 кг/см².

вания воды, б) из-за различия структур затвердевшего цементного камня.

Указанное можно наблюдать и на рис. 8, где приведены данные опытов Росса¹ с бетоном на нормальном портланд-цементе и на шлако-портланд-цементе.

Ползучесть бетона на шлако-портланд-цементе, примерно на 50 % больше, чем на портланд-цементе. Но вместе с тем из приведенных на графике данных о прочности бетона видно, что прочность портланд-цемента примерно на 15 % выше прочности шлако-портланд-цемента. Это снижает разницу в ползучести бетонов на этих двух цементах. Характерно, что усадка бетона на этих двух цементах одинакова, как это видно из графика. Мы полагаем, что вид цемента и его качество оказывают влияние на ползучесть по двум причинам: а) из-за различного связы-

¹ Ross A. D., Journal of the Institution of Civil Engineers, № 4, 1938, стр. 43.

Цемент, химически связывающий большее количество воды, даст меньшую ползучесть, ибо в цементном камне будет меньше свободной и полусвязанной воды, находящейся в коллоидах. Цемент с преобладанием коллоидных масс даст большую ползучесть, чем цемент с преобладанием кристаллических образований.

В пределах одинаковых структур портланд-цемента ползучесть связана с количеством свободной и полусвязанной воды, с пористостью и прочностью цементного камня.

Для выяснения справедливости высказанных положений, в данное время в ЛИИЖТ проводятся опыты по изучению ползучести бетона на разных цементах.

б) Влияние водоцементного отношения

В свете сказанного выше характер влияния водоцементного отношения на ползучесть бетона должен быть очевидным. Ползучесть увеличивается с ростом B/C , во-первых, потому, что с повышением B/C возрастает количество свободной и полусвязанной воды; размер пор, повидимому, также увеличивается, а это облегчает испарение воды из бетона. С другой стороны, цементный гель с повышением B/C становится менее прочным и более податливым.

Степень влияния B/C на ползучесть можно, например, установить из приводимых ниже данных. На рис. 9 приведены результаты опытов Дэвиса, из которых видно значительное влияние B/C на ползучесть бетона разных составов. Как в возрасте 30 дней, так и в возрасте 1 года при изменении B/C с 0,62 до 0,69 (состав бетона одинаковый) ползучесть увеличивается почти в $1\frac{1}{2}$ раза.

Это же ясно видно и из результатов опытов по определению ползучести вибрированного бетона, приведенных в табл. 5.¹

Из табл. 5 видно, что при уменьшении B/C с 0,40 до 0,35 ползучесть несколько повысилась. Причина такого явления станет ясной, если отметить, что прочность бетона при $B/C = 0,35$ в данных опытах получилась меньше, чем при $B/C = 0,40$. Это говорит о том, что $B/C = 0,35$ слишком мало и при определенной дли-

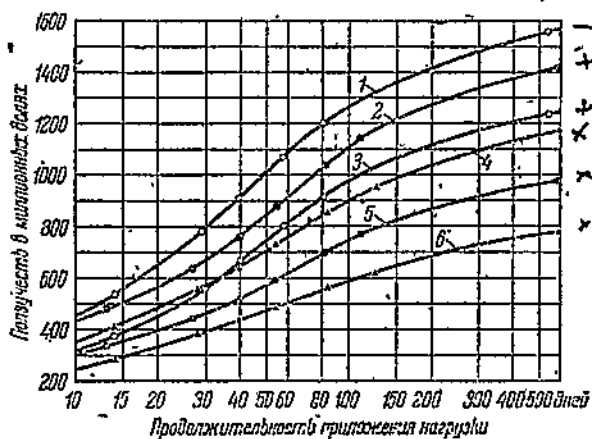


Рис. 9. Ползучесть бетонов разного состава и при разных водоцементных отношениях.

1 — состав 1 : 6,75, $B/C = 0,80$; 2 — состав 1 : 5,50, $B/C = 0,69$;
3 — состав 1 : 6,75, $B/C = 0,69$; 4 — состав 1 : 4,25, $B/C = 0,62$;
5 — состав 1 : 5,50, $B/C = 0,62$; 6 — состав 1 : 4,25, $B/C = 0,50$.

¹ Journal of the Institution of Civil Engineers, № 6, 1938, стр. 564.

тельности вибрации бетон при $B/C = 0,35$ был плохо уплотнен. Большая пористость бетона вызвала большую ползучесть.

Говоря о влиянии B/C на ползучесть, не следует забывать, что приведенные данные относятся к случаю одинакового напряжения бетона от нагрузки, независимо от прочности бетона. Это крупная методологическая ошибка всех приведенных опытов, не позволяющая правильно оценить степень влияния B/C на прочность бетона.

Таблица 5

Состав бетона по весу	В/Ц по весу	Возраст, дни					Относительная прочность бетона в возрасте 7 дней (приблизительно)
		7	4	28	60	180	
		ползучесть на 1 кг/см ² в 10 ⁻⁶					
1:6	0,60	2,15	3,27	4,26	5,98	6,83	430%
	0,50	0,85	1,42	1,99	2,84	3,27	730%
	0,40	0,43	0,85	1,28	1,56	1,71	1000%
	0,35	0,57	1,13	1,16	1,71	1,99	830%

Нами в той же таблице подсчитана относительная прочность бетона в возрасте 7 дней (по данным цитированной статьи).

При сравнении приведенных в таблице данных все же видно, что если даже внести поправку на прочность, влияние B/C на ползучесть остается заметным.

в) Влияние состава бетона и консистенции

Рассматривая вопрос о влиянии состава бетона на ползучесть, следует различать два случая. Ползучесть бетона разных составов при одинаковом водоцементном факторе будет различна, причем большей ползучестью должен отличаться бетон с большим расходом цемента, как это видно из рис. 9.

Если же рассматривать бетоны разных составов при одинаковой консистенции, то большую ползучесть имеет более тощий бетон, ибо в этом случае у него будет большее B/C и меньшая прочность. При одинаковом составе увеличение пластичности бетонной смеси увеличит ползучесть бетона по той же причине.

Указанное влияние состава бетона и консистенции наблюдалось рядом исследователей, в том числе и в наших опытах при сжатии бетона в молодом возрасте.¹

В свете сказанного необходимо внести поправку в существующее на основе опытов Калифорнийского университета и других мнение, что тощие бетоны текут значительно сильнее жирных. Этого мнения придерживается и проф. Столяров.² Указание проф. Столярова верно, если сравнивать ползучесть бетонов раз-

¹ А. Е. Иохельсон, Н. Г. Корсаков, А. В. Саталкин и П. В. Тарасов, Физико-механические свойства бетона, Госстройиздат, 1939, стр. 50—51.

² Я. В. Столяров, Теория железобетона на экспериментальной основе, 1934, стр. 199.

ного состава при одинаковой консистенции, т. е. с разным B/C , а следовательно, с разной прочностью. В этом случае при одинаковом численно напряжении фактически бетоны нагружены с разной интенсивностью, причем тощий бетон нагружен больше, чем жирный. Такую же ошибку допускает проф. Нилендер¹ на основе прежних опытов американских исследователей.

г) Влияние вида и гранулометрии заполнителей

В опытах проф. Дэвиса в Калифорнийском университете определялась ползучесть бетона на заполнителях разного минералогического состава. Некоторые из результатов этих опытов приведены в табл. 6.

Результаты опытов проф. Дэвиса

Таблица 6

Вид заполнителя	Состав бетона по весу	B/C по весу	Модуль крупности	Напряжение $кг/см^2$	Возраст нагружения дни	Дантельность нагрузки дни	Ползучесть в миллионных долях
Известняк . . .	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	542
Кварц	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	805
Гранит	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	785
Гравий	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	975
Базальт	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	1060
Песчаник . . .	1:5,67	0,89	5,75	56	28	1950	1300

На рис. 10 и 11 приведены кривые ползучести бетона на разных заполнителях (по Дэвису).² Начальные деформации различались незна-

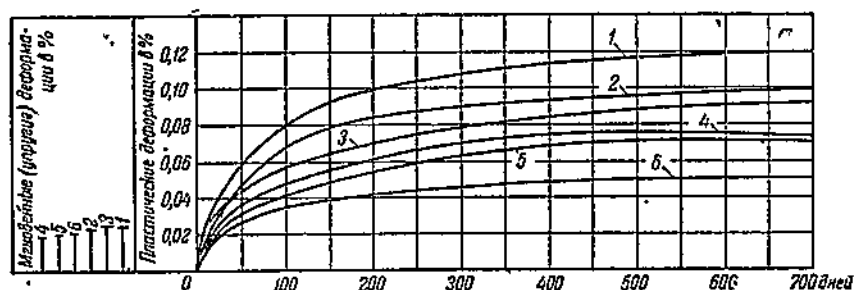


Рис. 10. Ползучесть бетона, приготовленного на разных заполнителях.

Состав бетона 1:5,67; $B/C=0,89$; $n=56$ $кг/см^2$; хранение воздушное (влажность 50%); возраст при нагружении 28 дней. 1 — песчаник; 2 — базальт; 3 — гравий; 4 — гранит; 5 — кварц; 6 — известняк.

чительно. Непосредственное рассмотрение данных, приведенных в табл. 6, не позволяет сделать ясных выводов о причинах влияния заполнителей на ползучесть бетона. Так как B/C одинаково, то прочность бетона, надо думать, не могла заметно различаться. Можно

¹ Промстройпроект, Справочник проектировщика промышленных сооружений, т. IV, 1935, статья проф. Нилендера.

² Взято из цитированной выше статьи проф. Нилендера в Справочнике проектировщика промышленных сооружений, т. IV, 1935.

предположить влияние модулей упругости заполнителей, но, к сожалению, о них нет данных.

Воспользуемся табл. 7, взятой из статьи проф. Нилендера, где приведены данные о модулях упругости каменных материалов.

Таблица 7

Модули упругости при сжатии для естественных камней

Порода камней	E в кг/см^2	Примечание
Песчаник	30 000—75 000	По данным Графа
Гранит обыкновенный	153 000—231 000	
Гранит красный, крупнозернистый	390 000—400 000	
Гранит серый, мелкозернистый	680 000—700 000	По данным ЦНИПС
Раковистый известняк	720 000—730 000	
Базальт	997 000—1 670 000	По данным Графа

В этом отношении интересно отметить влияние заполнителей на усадку бетона согласно опытам Графа,¹ приведенным в табл. 8.

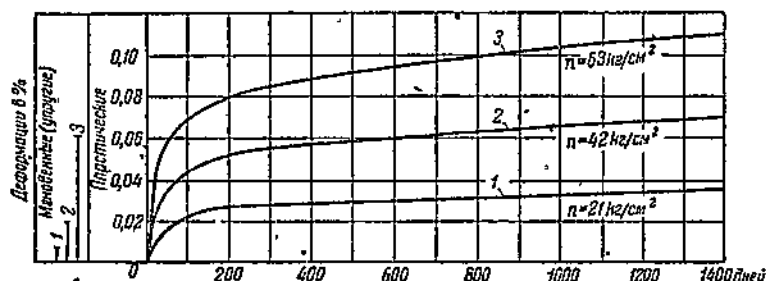


Рис. 11. Ползучесть бетона при различных напряжениях.
Состав бетона 1 : 5,05, $B/C = 1,03$, хранение воздушное (влажность 70%).

1 — деформации при напряжении 21 кг/см^2
2 — " " " 42 " "
3 — " " " 63 " "

Из табл. 8 видно влияние вида заполнителя на величину усадки, причем последняя находится примерно в обратной зависимости от модуля упругости заполнителя и бетона. Проф. Столяров со ссы-

Таблица 8

Заполнитель	Модуль упругости		Усадка в мм/м при сухом хранении 60 дней	Разбухание после 120 дней водного хранения
	заполнителя кг/см^2	бетона кг/см^2		
Базальт	1 015 000	308 000	0,39	0,42
Известняк	71 000	107 000	0,69	0,63
Гранит	168 000	223 000	0,49	0,45
Известняк	721 000	263 000	0,31	0,60
Доменный шлак	960 000	377 000	0,27	0,30

¹ Beton und Eisen, № 7—8, 1933.

кой на проф. Дэвиса, объясняет это обстоятельство влиянием не только модуля упругости заполнителя, но и его гранулометрического состава и, в частности, модуля поверхности как фактора, обуславливающего «относительный размер цементной оболочки между зернами».

Мы полагаем, что модуль поверхности оказывает влияние на величину усадки, особенно при сравнении гравия со щебнем, но при одинаковой крупности щебня едва ли он оказывает главное влияние, так как величина его при этом условии вряд ли сильно разнится. По нашему мнению, причинами влияния вида заполнителя на ползучесть и усадку бетона являются два обстоятельства: различная адсорбционная способность и различный модуль упругости. Первое изменяет электрохимические сорбционные силы, определяющие собой мениски в капиллярах и сцепление цементного

камня с заполнителем, а также влияющие и на модуль упругости раствора. Влияние модуля упругости заполнителя объясняется аналогично влиянию арматуры. При модуле упругости заполнителя, близком или равном модулю упругости цементного раствора, и деформации будут близкими, или одинаковыми, а напряженное состояние в теле бетона однородным. Чем больше разница в величинах модулей упругости раствора и заполни-

теля, тем более разнятся и деформации бетона; при этом, чем выше модуль упругости заполнителя по сравнению с модулем упругости раствора, тем меньше будет общая деформация бетона от усадки и ползучести, так как различие модулей упругости вызывает в растворе напряжения обратного знака, уменьшающие деформации от усадки и ползучести.

Однако важны не только величины модулей заполнителя, но и его адсорбционная способность, меняющая модуль упругости раствора. Если бы не было этого второго обстоятельства, то кривая для бетона на базальте (рис. 10) расположилась бы не на втором месте сверху, а ниже всех других кривых. По этой же причине кривая для бетона на известняке расположилась ниже всех. Как известно, известняк обладает большой водопоглощаемостью и адсорбционной способностью, меняющей свойства раствора.

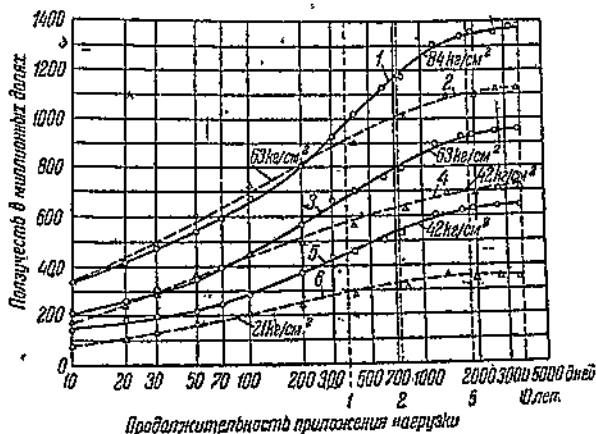


Рис. 12. Ползучесть бетона разного возраста при различных напряжениях (по Дэвису).

1 — нагружение в 3-месячном возрасте, 84 кг/см²; 2 — нагружение в 28-дневном возрасте, 63 кг/см²; 3 — нагружение в 3-месячном возрасте, 63 кг/см²; 4 — нагружение в 28-дневном возрасте, 42 кг/см²; 5 — нагружение в 3-месячном возрасте, 42 кг/см²; 6 — нагружение в 28-дневном возрасте, 21 кг/см².

д) Влияние величины нагрузки

Естественно ожидать увеличения ползучести с повышением интенсивности нагрузки. Это рельефно видно из рис. 11 и 12, составленных по опытам Дэвиса.

Аналогичные данные получались в опытах Гленвилля, Дюгрона, Росса и Шенка.

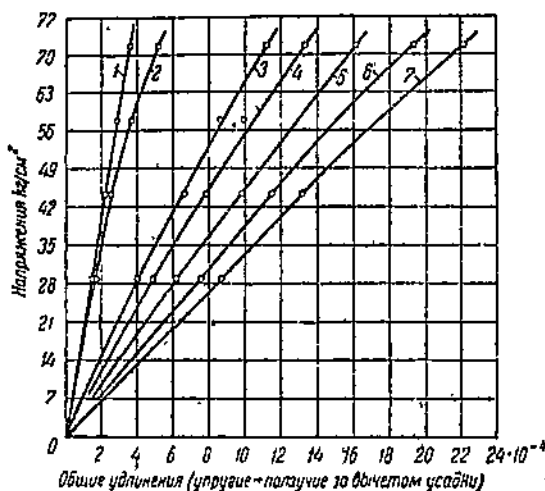


Рис. 13. Ползучесть бетона различного возраста при различных напряжениях.

1 — мгновенное нагружение; 2 — кривая нагружения; 3 — 7 дней; 4 — 14 дней; 5 — 30 дней; 6 — 60 дней; 7 — 160 дней.

Из приведенных данных видно, что величина ползучести почти пропорциональна напряжениям. Это еще более ясно видно из графика рис. 13,¹ показывающего связь деформаций с напряжениями при разных сроках нагружения.

Следовательно, практически можно принять прямую пропорциональность между ползучестью и интенсивностью нагрузки. Однако едва ли такая пропорциональность имеет место при любой величине напряжения.

Так, Шенк указывает,

что пропорциональность между ползучестью и напряжением существует лишь до напряжения, составляющего одну треть временного сопротивления.

Руссель, Дженсен и Ричарт (Russel, Jensen and Richart), производившие исследования ползучести при кратких длительностях нагружения² (до 30 минут), обнаружили такую пропорциональность деформаций и напряжений в пределах до 50% от временного сопротивления бетона сжатию.

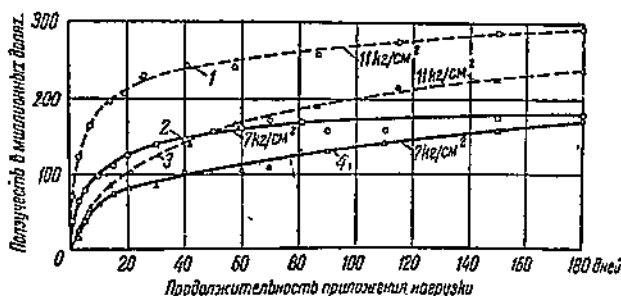


Рис. 14. Ползучесть бетона при сжатии и растяжении.

1 — растяжение, нагружение в 28-дневном возрасте, 11 кг/см²;
2 — растяжение, нагружение в 7-дневном возрасте, 7 кг/см²;
3 — сжатие, нагружение в 28-дневном возрасте, 11 кг/см²;
4 — сжатие, нагружение в 7-дневном возрасте, 7 кг/см².

¹ Опыты Росса.

² Short-time creep tests of concrete in compression, Proceedings of the American Society for Testing Materials, v. 38, 1938, стр. 410.

е) Влияние характера нагрузки

Большинство исследований ползучести производилось при сжатии, но имеются исследования ползучести и при растяжении.

Из опытов Гленвилля следует, что ползучесть при растяжении и сжатии почти одинакова. Однако Дэвис установил, что ползучесть при растяжении больше, чем при сжатии, как это рельефно видно из рис. 14. Но вместе с тем, как видно из графика, разница между ползучестью при растяжении и сжатии, сильно заметная в первое время, со временем уменьшается. Повидимому, ползучесть при сжатии, медленно развивающаяся сначала, будет длиться дольше, чем при растяжении. В дальнейшем ползучести при сжатии и растяжении могут выравниваться. Опыты с балками тоже показали, что ползучесть растянутой зоны больше, чем сжатой, и иногда значительно (рис. 15 и 16).

На рис. 15 и 16 приведены результаты опытов по измерению деформации при изгибе волокон балок на разных расстояниях от нейтральной оси. Рис. 15 отвечает балке, находившейся во влажных условиях и нагруженной в возрасте 7 дней; Рис. 16 отвечает аналогичной балке, но перенесенной в возрасте 28 дней из влажных условий на воздух при 50% влажности. В этой балке на 41-й день появились трещины.

Как видно из диаграммы, в возрасте 40 дней для балки, хранимой на воздухе, ползучесть крайнего сжатого волокна была в 3 раза, а крайнего растянутого волокна в 10 раз больше соответствующих деформаций в балке, твердевшей во влажных условиях.

Исследования Дютрона также установили, что ползучесть при растяжении больше, чем при сжатии.

Прогибы балок под нагрузкой со временем возрастают так же, как деформации при сжатии и растяжении. Для примера приводим график изменения прогиба балки по опытам Росса (рис. 17).

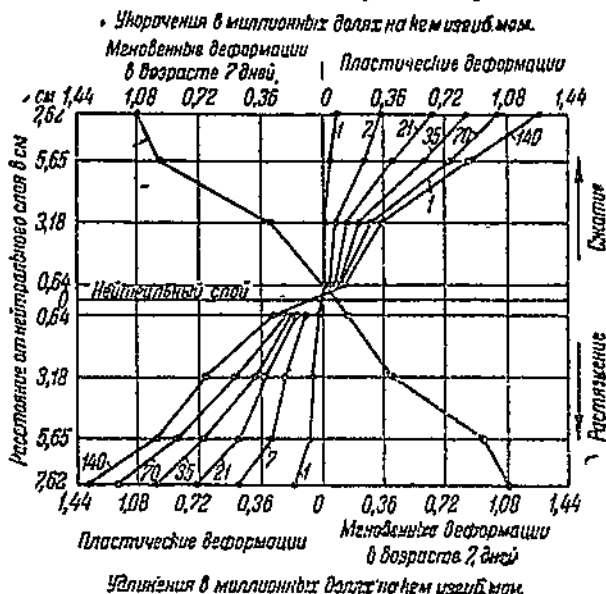


Рис. 15. Деформации волокон балки на единицу изгибающего момента (балка нагружена в 7-дневном возрасте).

На кривых показано число дней выдерживания под нагрузкой.

Возникает вопрос, изменится ли ползучесть в случае всестороннего сжатия по сравнению с простым сжатием под влиянием препятствий для свободных поперечных деформаций при простом

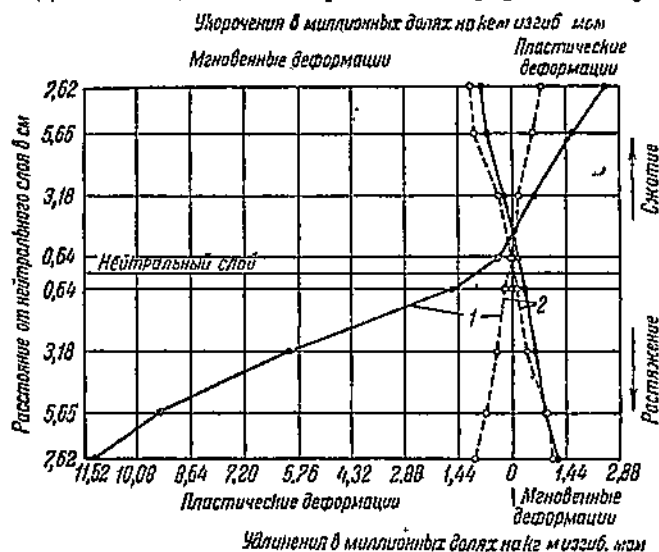


Рис. 16. Деформации волокон балки на единицу изгибающего момента (балка нагружена в 28-дневном возрасте).

1 — возраст 40 дней; 2 — хранение в воздухе со 100% влажностью.

сжатия, если таковые имеют место. По мнению Томаса и Гленвилля, поперечные деформации при простом сжатии ничтожны. По

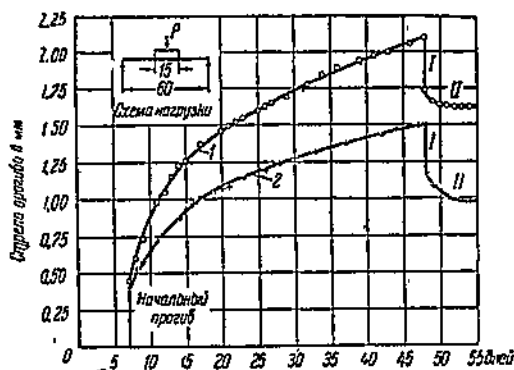


Рис. 17. Изменение прогиба балки под нагрузкой со временем.

1 — шлако-портланд-цемент; 2 — нормальный портланд-цемент; I — упругое восстановление; II — пластическое восстановление.

опытам Дэвиса, поперечные деформации малы по сравнению с продольными, но все же составляют около $\frac{1}{5}$ продольных. Специальные опыты Дэвиса, в которых отсутствовала возможность свободных поперечных деформаций при сжатии за счет специального бокового давления, показали, что эти ограничения с боков почти не сказались на величине продольных деформаций.

Интересно отметить обнаруженное Дэвисом и проверенное нами явление обратимости ползучести, или так называемое пластическое последствие. Ползучесть сжатых образцов постепенно уменьшилась на некоторую величину

после снятия нагрузки. То же показывает и рис. 17, где видна некоторая обратимость прогиба балки после разгрузки.

ж) Влияние возраста бетона к моменту нагружения

Как нами указывалось, большинство исследований ползучести проводилось для бетона зрелого возраста и притом при сжатии. В лучшем случае опыты начинались в семидневном возрасте бетона. Нам известна лишь одна работа,¹ при проведении которой бетон нагружался в трехдневном возрасте; однако в ней нет данных для сравнения с ползучестью бетона в более позднем возрасте. В основном данные о влиянии возраста на величину ползучести можно найти в работах Гленвилля, Шенка и Дэвиса. В табл. 9 приведены некоторые из результатов опытов Дэвиса² с портланд-цементом и низкотермичным цементом.

Таблица 9

Возраст при нагруже- нии	Цемент	Ползучесть в миллионных долях на единицу напряжения (на 1 кг/см ²)				
		Время нахождения под нагрузкой, дни				
		3	7	28	60	120
7 дней	Нормальный портланд-цемент	2,56	4,13	5,84	6,70	7,55
	низкотермичный	4,55	7,10	11,4	12,80	13,50
28 дней	Нормальный портланд-цемент	0,71	0,85	1,28	1,71	2,28
	низкотермичный	1,28	1,57	2,28	2,70	3,13

Из табл. 9 видно, что ползучесть бетона, нагруженного в возрасте 7 дней, более чем в 3 раза превышает ползучесть бетона в возрасте 28 дней.

На рис. 18 приведены кривые ползучести бетона разного возраста, полученные Шенком. На рис. 19 приведены результаты опытов Гленвилля. На последнем графике начальные точки кривых ползучести бетона разного возраста смещены по вертикали.

Из приведенных данных следует, что величина ползучести весьма значительно зависит от возраста, в котором нагружен бетон. Ползучесть увеличивается с уменьшением возраста на-

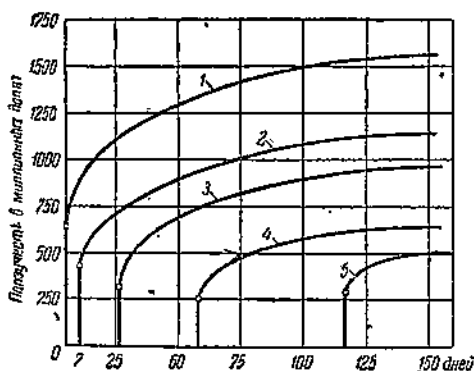


Рис. 18. Ползучесть бетонов различных возрастов.

1 — 7 дней — 60 кг/см²; 2 — 14 дней — 61 кг/см²; 3 — 28 дней — 61 кг/см²; 4 — 2 месяца — 58 кг/см²; 5 — 1 год — 58 кг/см².

¹ Investigation on the vibration concrete, interim Report № 2, Journal of the Institution of Civil Engineers, № 6, 1938, стр. 554.

² R. Davis, E. Davis and E. Brown, Plastic flow and volume changes of concrete, Proceedings of the American Society for Testing Materials, 1937.

гружения бетона. Вместе с тем, из рис. 19 видно, что после некоторого времени (6 месяцев) скорость ползучести не зависит от начального возраста бетона. Из долговременных опытов Дэвиса следует, что со временем скорость ползучести постепенно уменьшается и кривая

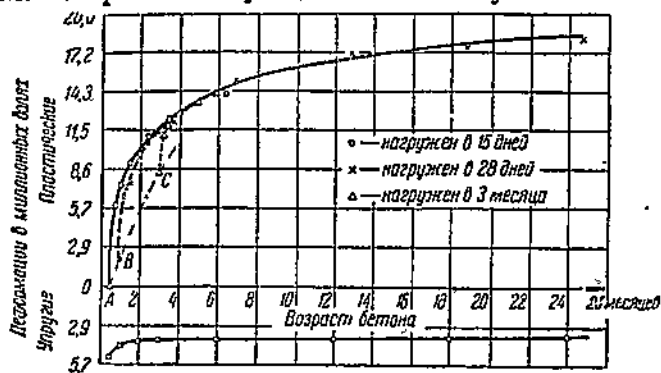


Рис. 19. Ползучесть бетонов различных возрастов на единицу напряжений. Бетон на нормальном портланд-цементе, состав 1:2:4 по весу, осадка конуса 5 см.

ползучести приближается к некоторой предельной горизонтальной прямой параллельной оси абсцисс. Предельная ползучесть достигается в различные сроки в зависимости от возраста нагружения. Это подметил Томас, давший кривую отношения предельной ползучести к ползучести в годичном возрасте. Эта кривая построена

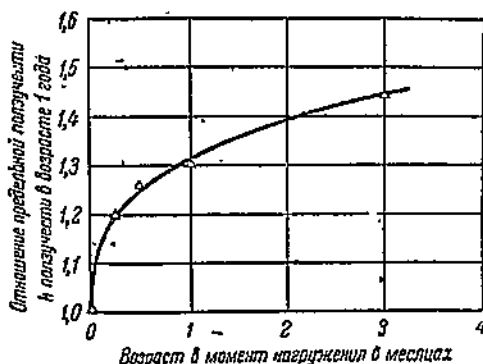


Рис. 20. Кривая предельной ползучести.

на рис. 20. Из нее видно, что для бетона, загруженного в возрасте 7 дней, предельная ползучесть составляет около 120% от годовой, тогда как для бетона месячного и трехмесячного возраста она равна соответственно 130 и 145% годовой ползучести. Согласно опытам Дютрона, после 3—4 месяцев нахождения бетона под нагрузкой он приобретает примерно 50% своей предельной ползучести, в годичном возрасте — около 80% и двухгодичном возрасте — до 95% предельной ползучести.

Отмеченная зависимость ползучести от возраста при нагружении совершенно понятна. По мере затвердевания цементного камня количество свободной и полусвязанной воды, влияющей на величину ползучести, уменьшается за счет углубления гидратации цемента и потери воды на испарение. С другой стороны, податливость геля, значительно обезвоженного и затвердевшего в бетоне зрелого возраста, понижена. В отмеченных опытах влияние воз-

раста сказывалось особенно рельефно потому, что интенсивность нагрузки была по существу разной в разных возрастах, причем с увеличением возраста интенсивность нагрузки падала.¹

В нашей работе по исследованию ползучести бетона при растяжении, в настоящее время еще незаконченной, нагружался бетон разных возрастов, начиная с однодневного. Опыты эти позволили установить некоторые особенности кривых ползучести, которые не улавливались другими исследователями в опытах на сжатие с бетоном более зрелого возраста. В раннем возрасте, как было отмечено, основным фактором, определяющим явление ползучести, является не только изменение гигрометрического состояния при нагрузке. В раннем возрасте, в самой начальной стадии твердения бетона, когда совершается процесс формирования его структуры, структуры цементного камня, нагрузка нарушает ход этого процесса, вносит изменения в структуру, особенно если учесть, что нами изучалась ползучесть при растяжении. В ближайшее время наши опыты будут опубликованы.

э) Влияние условий твердения бетона

Опыты показывают, что с увеличением влажности воздуха ползучесть уменьшается, и наоборот. Ползучесть в воде значительно меньше ползучести на воздухе. Сказанное вытекает из самой физической сущности явления ползучести, связанного в значительной

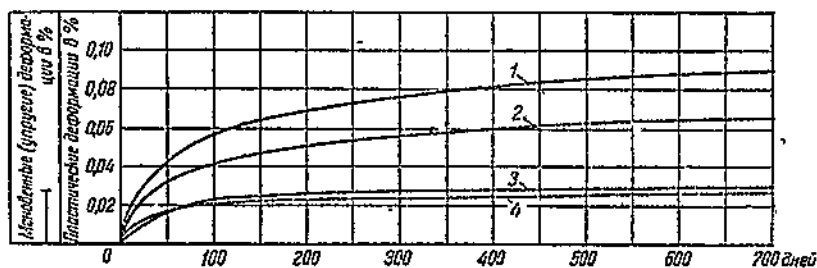


Рис. 21. Ползучесть бетона при различной влажности среды твердения. Состав бетона 1:5,67; В/Ц = 0,89; $\rho = 56 \text{ кг/см}^3$; нагружение в 28-дневном возрасте.

1 — при влажности 50%; 2 — при влажности 70%; 3 — при влажности 100%; 4 — в воде.

степени с испарением воды из цементного геля. Интенсивность испарения связана с влажностью воздуха, т. е. с изменением разницы давлений внутри и вне бетона. В связи с этим понятно и влияние температуры на величину ползучести бетона в условиях воздушного твердения, так как с повышением температуры уменьшается влажность воздуха.

Для иллюстрации приводим на рис. 21² результаты опытов Дэвиса, проведенных при температуре $= 21^\circ$ и при влажности воздуха

¹ Опыты проводились при постоянном напряжении, тогда как прочность бетона разного возраста различна.

² Взято из цитированной выше статьи проф. Нилендера.

50, 70, 100%, а также в воде. Ползучесть бетона при влажности 70% примерно в 2 раза больше, чем в воде. Ползучесть в воде примерно эквивалентна ползучести при влажности 100%. Такие же результаты получились у Шенка и Гленвилля.

Условия твердения бетона до нагружения, обуславливающие его гигрометрическое состояние в момент нагружения, конечно также должны сказываться на ползучести. Очевидно, бетон, твердевший в воде, будет под нагрузкой на воздухе обнаруживать значительно большую ползучесть, чем в тех же условиях бетон, твердевший до нагрузки на воздухе. Последний за время твердения потерял уже значительную долю воды и получил значительно большую усадку, чем бетон, твердевший во влажных условиях. Это хорошо подтверждается нашими опытами, опытами Дютрона и других исследователей.

Разница в величинах ползучести бетона, твердевшего до нагружения на воздухе и во влажных условиях, очевидно будет тем больше, чем суше воздушная среда и чем длиннее срок предварительного твердения.

Таблица 10

Условия твердения		Относительная ползучесть
до нагружения	в нагруженном состоянии	
Вода	Вода	1,0
Сухой воздух . .	Вода	1,7—2,20
Влажный воздух .	Влажный воздух (65—70%)	2,10—2,70
Сухой воздух . .	Сухой воздух (45—50%)	3,10—3,40
Вода	Сухой воздух (45—50%)	4,0—4,50

Для иллюстрации влияния условий твердения бетона на ползучесть приводим в табл. 10 данные из опытов Дютрона.

При рассмотрении результатов, приведенных в данном разделе, не следует забывать наших замечаний о некоторой условности вы-

числения ползучести как разницы полных деформаций и деформаций от усадки, так как усадка нагруженных образцов протекает в иных условиях и имеет другую величину, чем усадка ненагруженных образцов.

В связи с рассматриваемым вопросом интересно отметить, что Дэвис наблюдал разбухание предварительно высушенного бетона под нагрузкой за счет сильного поглощения влаги. За вычетом разбухания ненагруженного образца отмечалась весьма малая ползучесть.

и) Влияние метода укладки и уплотнения бетона

Вопрос о влиянии метода укладки на ползучесть изучен экспериментально сравнительно мало. Тем не менее, на основе изучения влияния всех других факторов и сочетания их с особенностями различных методов укладки, можно с достаточной уверенностью высказать мнение о характере влияния методов укладки на ползучесть бетона.

Помимо обычного штыкования, практическое значение имеют два метода: вибрация и центрофугирование.

Вибрация бетона позволяет укладывать бетон более жесткой консистенции, что вызывает понижение его ползучести. Так же будет действовать и уменьшение расхода цемента, допускаемое вибрацией (при одинаковом B/C). Наиболее интересно сравнить влияние вибрации как метода уплотнения при прочих равных условиях (т. е. при постоянных B/C и расходе цемента). Следует ожидать и в этом случае некоторого снижения ползучести бетона, ибо бетон будет обладать меньшей пористостью, сами поры будут меньшего диаметра. Однако большого влияния в данном случае ожидать не приходится.

Опытные данные английского Комитета по вибрации¹ подтверждают сказанное, как это видно из табл. 11.

Таблица 11

Состав бетона по песку	B/C по песку	Метод укладки	Ползучесть в миллионных долях на единицу напряжения (на 1 кг/см ²)				
			7 дней	14 дней	28 дней	3 месяца	6 месяцев
1:6.	0,6	ручной	1,99	3,42	4,55	6,12	7,4
1:6	0,6	вибрация	2,15	3,27	4,25	5,98	8,83

Наконец, вибрация позволяет уменьшить содержание песка, применять более гравелистые бетоны, причем следует ожидать также некоторого снижения ползучести вибрированного бетона за счет этого фактора.

Следует отметить, что в статье Дженсена и Ричарта,² описывающей ускоренные методы оценки ползучести бетона, указывается на увеличение ползучести вибрированного бетона по сравнению со штыкованным. Однако сами авторы не находят возможным указать причину такого явления, считая его непонятным. Надо думать, что здесь налицо скорее какие-нибудь погрешности методики, чем действительная особенность вибрации.

Ползучесть центрофугированного бетона изучалась в Закавказском институте сооружений проф. В. В. Михайловым³ и инж. Ци-скрели. Ими отмечаются низкая ползучесть и усадка центрофугированного бетона. Коэффициент ползучести центрофугированного бетона в 6-месячном возрасте составлял $k = 2,2 \cdot 10^{-6}$, в годичном $k = 3,10^{-6}$. Под коэффициентом ползучести в данном случае понимается относительная ползучесть при напряжении 1 кг/см².

Данные опытов Закавказского института сооружений приведены на рис. 22.

к) Влияние размеров образцов

Приводимые разными авторами коэффициенты ползучести помимо всего прочего отвечают вполне определенной форме и размерам

¹ Journal of the Institution of Civil Engineers, № 6, 1936.

² Jensen and Richart, Short-time creep tests of concrete in compression, Proceedings of the American Society for Testing Materials, v. 38, 1938.

³ В. В. Михайлов, Теория и практика центробежного напряженно-армированного бетона, Госстройиздат, 1939.

образцов, на которых производилось изучение ползучести. Тем более разные коэффициенты ползучести будут иметь место в различных по размерам бетонных конструкциях.

Совершенно естественно ожидать влияния размера образца на ползучесть в том смысле, что с увеличением размеров образца ползучесть уменьшается. Такое явление должно иметь место, во-первых, потому, что испарение воды из поверхностных и внутренних частей образца проходит далеко не с одинаковой интенсивностью. Кроме того, напряженное состояние различных зон конструкций различно. Уже было показано, что наружные волокна имеют ползучие деформации больше, чем внутренние (рис. 15 и 16). Чем больше размеры образца, тем значительнее разница в величинах ползучести внутренних и наружных волокон и тем меньше будет средняя для всего образца величина ползучести.

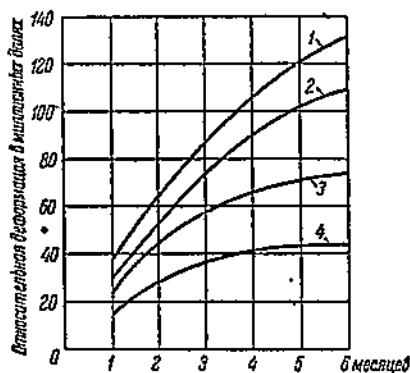


Рис. 22. Ползучесть центробежного бетона.

1 — $\sigma = 60 \text{ кг/см}^2$; 2 — $\sigma = 45 \text{ кг/см}^2$; 3 — $\sigma = 30 \text{ кг/см}^2$; 4 — $\sigma = 15 \text{ кг/см}^2$.

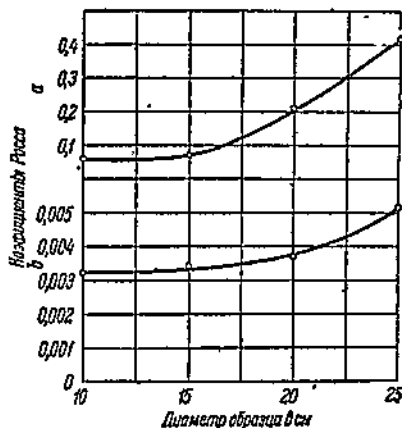


Рис. 23. Зависимость ползучести бетона от размеров образца.

Экспериментальную проверку влияния размеров образцов на ползучесть производил Дэвис. На рис. 23 приведены кривые изменения коэффициентов a и b в формуле Росса.¹

$$c = \frac{t}{a + bt},$$

в зависимости от диаметра образца.

Очевидно увеличению a и b отвечает уменьшение ползучести c при том же возрасте t . Из рис. 23 видно, что ползучесть уменьшается с увеличением размеров образцов. Вместе с тем Дэвис подчеркивает скорость изменения ползучести со временем в разных образцах. Возможно, что в отдаленные сроки величина ползучести для всех образцов будет одинакова.

Отсюда можно сделать вывод, впрочем ясный и без графика, что чем массивнее сооружение, тем дольше в нем при одинаковой нагрузке будет проявляться ползучесть бетона.

¹ См. ниже.

л) Влияние арматуры

Вопрос о влиянии арматуры на ползучесть бетона имеет значение потому, что до сих пор для учета ползучести при рассмотрении работы железобетонных конструкций пользовались опытными данными, относящимися к бетону.

Наличие арматуры, уменьшающей усадку бетона и создающей благодаря этому растягивающие напряжения в нем, должно сказываться и на ползучести бетона. Влияние арматуры зависит от условий работы конструкций. В элементах, работающих на сжатие, введение арматуры уменьшает ползучесть; в растягиваемых элементах арматура увеличивает ползучесть.

Причиной такого различного влияния арматуры является, по мнению автора, усадка бетона. Действительно, в сжатых элементах бетон ползет под влиянием сжимающих напряжений от внешней нагрузки. В армированных элементах при одинаковой нагрузке эти напряжения несколько уменьшаются под влиянием усадки бетона, разгружающей бетон и перегружающей арматуру.

По опытам Дэвиса для колонн из бетона состава 1:5, нагруженных в возрасте 2 месяцев и находившихся 18 месяцев под нагрузкой с интенсивностью 56 кг/см^2 , ползучесть оказалась равной 0,6 мм на 1 пог. м; в армированных колоннах¹ при тех же условиях — 0,4 мм на 1 пог. м, т. е. меньше на 33%. В опытах Дэвиса имелась значительная арматура; с понижением же процента армирования различие в ползучести бетонного и железобетонного элементов будет уменьшаться, ибо влияние усадки с повышением процента армирования растет.²

В растягиваемых элементах ползучесть будет проявляться под влиянием растягивающих напряжений в бетоне, которые при наличии арматуры будут увеличенными за счет дополнительных растягивающих напряжений от усадки. Дютрон на основе своих опытов указывает на большую ползучесть при растяжении в армированных элементах по сравнению с неармированными.

5. Уравнения ползучести

В настоящее время разными авторами предложено несколько видов уравнений ползучести, а также ряд методов расчета железобетонных элементов с учетом ползучести бетона. Освещение методов расчета не входит в содержание данного обзора; ниже нами рассматриваются лишь некоторые из уравнений ползучести и дается количественная оценка этого явления.

Штрауб (*Straub*) предложил следующую формулу:

$$\rho = k \cdot \sigma^n \cdot t^q, \quad (9)$$

где ρ — относительная ползучесть за время t ;

σ — напряжение;

k — коэффициент, получаемый из опытных данных;

p и q — показатели, зависящие от условий загрузки.

¹ 30% продольной арматуры и 1,80% спиральной.

² Это констатирует в своих опытах Дютрон.

По мнению Шенка, формула Штрауба обладает достаточной точностью для времени в пределах года, а дальше дает значительные отклонения. Шенк,¹ упрощая формулу Штрауба и считая ползучесть пропорциональной напряжению, дает уравнение ползучести в виде

$$\rho = c \sqrt[a]{t}, \quad (10)$$

где ρ — ползучесть на единицу напряжения во время t ;
с и a — коэффициенты, зависящие от условий опыта.

Шенк, анализируя данные своих опытов и опытов других исследователей, дает следующие значения коэффициентов с и a (табл. 12).

Таблица 12

Вид цемента	Вид заполнителя	Возраст к моменту нагружения	Коэффициенты			
			с		а	
			воздух	вода	воздух	вода
Обыкновенный портланд-цемент	Обычный	7 дней	0,207	—	2,8	—
	Обычный	14 дней	0,151	—	2,8	—
	Обычный	28 дней	0,128	0,088	2,9	6,0
	Обычный	2 мес.	0,088	—	2,5	—
Обыкновенный портланд-цемент	Гранитный щебень	28 дней	0,287	0,145	5,0	4,8
	Песчаник	28 дней	0,125	—	5,0	—
	Базальт	28 дней	0,170	—	3,2	—
	Обычный	28 дней	0,053	0,055	3,2	4,3
Высокосортный цемент	Обычный	7 дней	0,096	—	3,3	—
Глиноземистый цемент	Обычный	28 дней	0,036	0,023	2,6	2,2
	Обычный	7 дней	0,100	—	3,4	—

Для обычного бетона на портланд-цементе Шенк дает зависимость, связывающую коэффициент с при $a = \text{const} = 3$ с моментом нагружения в виде

$$c = 0,50 a^{-\frac{1}{2,5}}. \quad (11)$$

Такие же зависимости для коэффициентов с и a выведены Шенком для других цементов и бетонов.

Неудобство формул Штрауба и Шенка заключается в том, что для различного времени t необходимо знать свои коэффициенты; кроме того, как отмечает и Шенк, эти формулы не имеют физического смысла, ибо при $t = \infty$ и ползучесть становится бесконечной, а не стремится к пределу, как это имеет место в самом деле.

Томас² предложил более точную, но и более сложную формулу:

$$\rho = c_2 f_c [1 - e^{-A(t + a)^m - a^m}], \quad (12)$$

¹ L. Shank, Engineering Experimental Station Ohio University, т. IV, № 5, 1935. Реферат в Стройиндустрии, № 4, 1936.

² F. G. Thomas, A conception of the creep of unreinforced concrete and an estimation of the limiting values, The Structural Engineer, v. XI, № 2, 1933.

где $\rho \frac{\sigma}{f_c}$ — относительная ползучесть за время t ;
 f_c — начальное напряжение в бетоне;
 A, a, m и c_2 — коэффициенты, получаемые из опыта, учитывающие свойства бетона;
 e — основание натуральных логарифмов.

В формуле Томаса учитывается, что скорость ползучести убывает, стремясь к 0 при $t = \infty$. Ползучесть по формуле Томаса имеет предел.

На рис. 24 и 25 приведены кривые ползучести для бетона на нормальном и быстротвердеющем цементах; на них нанесены предельные значения ползучести по Томасу. Эти же предельные значения даны в табл. 13, где они сравниваются с предельными значениями ползучести, подсчитанными по формуле Росса.¹

Дютрон² на основании своих опытов дает зависимость между продолжительностью нагружения и ползучестью в виде следующей формулы:

$$t = k \sqrt{\frac{n^3}{100 - n}}, \quad (13)$$

где t — продолжительность нагружения в днях;
 n — удельная ползучесть после t дней загрузки, выраженная в процентах от предельной ползучести;
 k — коэффициент, зависящий от условий твердения бетона, возраста к моменту нагружения и других факторов. По опытам Дютрона k колеблется от 200 до 240 для бетонов, твердевших в одинаковых условиях.

Фрейденталь³ установил гиперболическую зависимость, отвечающую формуле

$$c = \frac{at}{1 + bt} + \frac{\sigma}{10b}, \quad (14)$$

где c — относительная ползучесть в миллионных долях;
 t — время;
 σ — напряжение;
 a и b — коэффициенты.

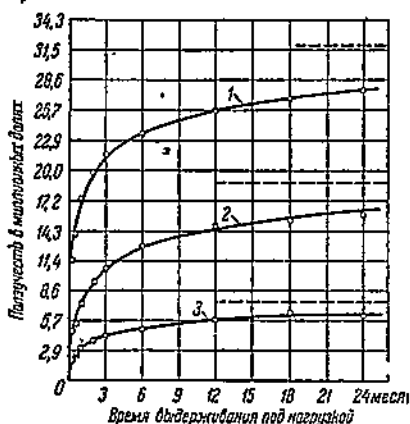


Рис. 24. Ползучесть бетонов различного состава, приготовленных на нормальном портланд-цементе (с предельными значениями ползучести).

1 — состав 1 : 3 : 6; $B/C = 0,85$ (по весу); 2 — состав 1 : 2 : 4; $B/C = 0,70$ (по весу); 3 — состав 1 : 1 : 2; $B/C = 0,40$ (по весу). Возраст при нагружении — 1 месяц. Пунктирные прямые — предельные значения ползучести для соответствующих составов по Томасу.

¹ A. D. Ross, Concrete creep data, The Structural Engineer, v. XV, 1937.

² Dutron, Déformations lentes du béton et du béton armé sous l'action des charges permanentes, Annales des Travaux Publics de Belgique, 1936 и 1937.

³ Beton und Eisen, № 11 и 25, 1935.

Предельные значения ползучести

Цемент и заполнитель	Состав бетона по весу	В/Ц по объему	Возраст бетона в момент нагружения	Предельное значение ползучести в миллионных долях на единицу напряжения (на 1 кг/см ²)	
				по Томасу	по Россу
Нормальный портланд-цемент	1:9	1,28	28 дней	31,7	30,5
	1:6	1,05	28 дней	19,1	18,0
и гравий	1:3	0,6	28 дней	7,65	7,25
Быстротвердеющий цемент	1:6	1,05	28 дней	7,4	7,45

Это уравнение, было упрощено Россом, который выражает закон изменения ползучести во времени формулой:

$$c = \frac{t}{a + bt} \quad (15)$$

или, приводя его к прямой,

$$\frac{t}{c} = a + bt, \quad (16)$$

где c — ползучесть в миллионных долях на единицу напряжения (фн/кв. дм);

a и b — коэффициенты;

t — время выдерживания под нагрузкой.

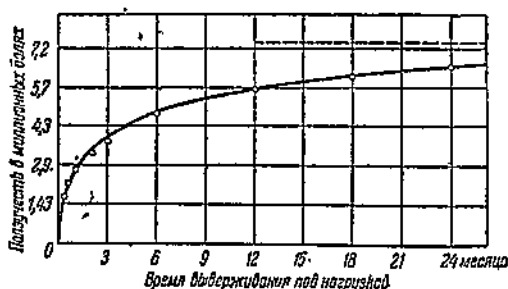


Рис. 25. Ползучесть бетона на быстротвердеющем цементе на единицу напряжений (с предельным значением ползучести).

Состав бетона 1:2:4 (по весу); В/Ц = 0,70; нагружение в возрасте 1 месяца; пунктирная прямая — предельная величина ползучести по Томасу.

Из рис. 26 видно, что наблюдаемые данные отличаются от подсчитанных по формуле 15 лишь в течение, примерно, первых шести месяцев, в дальнейшем имеется хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных.

Из табл. 13 видна близкая сходимость предельной ползучести по Томасу и Россу.

В табл. 14 приведен еще ряд данных, показывающих достаточную точность формулы Росса. В ней сравниваются опытные данные, полученные в более поздние сроки, с данными, подсчитанными по формуле 15 на основании более ранних определений ползучести для тех же образцов.

Используя данные 36 опытов разных исследователей и пользуясь своим уравнением, Росс построил диаграмму, приведенную на рис. 27, которой можно пользоваться для нахождения коэффициента b , а следовательно, предельной ползучести, определяемой по Россу как отношение

$$\frac{1}{b}.$$

Диаграмма отвечает применению гравия и гранитного щебня. В ней увязаны следующие факторы: влажность воздуха, напряжение, B/C , возраст в момент нагрузки, диаметр образца. При применении песчаника или известняка надо увеличить или уменьшить B/C на величины, указанные на графике.

Росс нашел, что в среднем коэффициенты его формулы связаны равенством $a = 137 B$. Вместе с тем, как видно из рис. 26, в первые сроки формула дает пониженные данные ползучести по сравнению с наблюдениями.

Если принять $a = 100 B$, то формула 15 примет вид:

$$c = \frac{t}{(100 + t) B} \quad (17)$$

В таком виде Росс применил уравнение для подсчета ползучести после

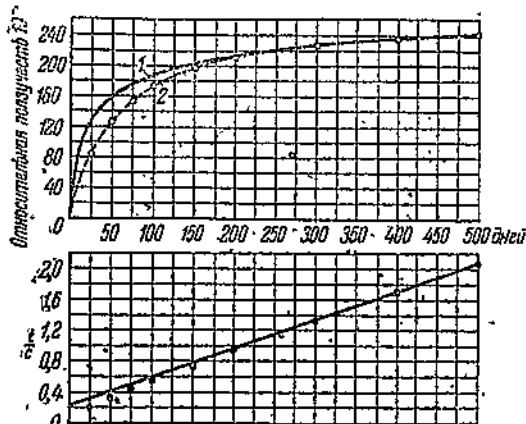


Рис. 25. Кривые ползучести бетона: экспериментальная и подсчитанная по формуле Росс. 1 — экспериментальная кривая; 2 — кривая, подсчитанная по формуле Росс: $c = \frac{t}{0,21 + 0,0037t}$.

Таблица 14

Заполнитель	Состав бетона по весу	B/C по объему	Напряжение при нагружении kg/cm^2	Возраст, дни		Влажность воздуха в %	Ползучесть в миллионных долях	
				к моменту нагружения	при наблюдении		подсчитанная	наблюденная
Известняк	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	540	550
Кварц	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	800	790
Гранит	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	795	850
Гравий	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	970	960
Базальт	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	1660	1100
Песчаник	1:5,67	0,89	56	28	1950	50	1300	1300
Гравий	1:5,67	0,89	56	28	1950	70	690	710
Гравий	1:5,67	0,89	56	28	1950	вода	270	300
Гравий	1:5,67	0,89	56	28	1950	100%	306	350
Гранит	1:5,05	1,03	21	28	2400	вода	123	140
Гранит	1:5,05	1,03	21	28	2400	70	372	360
Гранит	1:5,05	1,03	84	91	2400	вода	530	530
Гранит	1:5,05	1,03	63	28	2400	вода	613	650
Гранит	1:5,05	1,03	63	28	2400	70	1150	1120
Гранит	1:5,05	1,03	42	28	2400	70	750	700
Гранит	1:5,05	1,03	42	91	2400	70	680	620
Гранит	1:5,05	1,03	42	91	2400	70	1000	950
Гранит	1:5,05	1,03	21	7	2400	вода	195	200
Гранит	1:5,05	1,03	42	7	2400	вода	635	640
Гранит	1:5,05	1,03	42	28	2400	вода	355	390
Гранит	1:5,05	1,03	42	91	2400	вода	205	230
Гранит	1:5,05	1,03	63	91	2400	вода	410	400
Гранит	1:5,05	1,03	84	91	2400	70	1430	1350

100-дневного возраста и сравнил подсчитанные данные с наблюдаемыми в разные сроки (до 2400 дней). Сходимость в большинстве случаев получилась вполне удовлетворительной.

В заключение рассмотрения уравнений ползучести укажем на дифференциальное уравнение ползучести, предложенное инж. Б. Д. Фриденсоном.¹ Основанием для изыскания новой формулы послужило то, что все формулы (Штрауба, Томаса и Шенка) построены для постоянного напряжения. Вместе с тем опытным путем и теоретически доказано, что ползучесть в статически неопределимых конструкциях не влияет а усилия лишь в том случае, если они не вызваны нагрузкой из-за деформаций. Если последнее имеет место,

т. е., например, при осадке опор, температурных и других деформациях, ползучесть сказывается на величине напряжений, заставляя их снижаться, и одновременно уменьшается сама (вследствие пропорциональности напряжениям).

Важно знать закон ползучести при переменном напряжении. В этом случае, т. е. при переменном напряжении, имеется переменный или «эффективный» модуль упругости. Деформация складывается из начальной деформации, полученной при нагрузке и ползучести. Математически это можно выразить так:

$$e = \frac{F_{oc}}{E_{oc}} + \int_0^t \frac{dF_c}{E_c'} \cdot F(t), \quad (18)$$

где e — суммарная деформация за время t ;
 F_{oc} и E_{oc} — начальные напряжения и модуль упругости в момент загрузки;

E_c' — эффективный модуль упругости, равный $\frac{dF_c}{de'}$;

¹ Journal of the American Concrete Institute, № 5, 1935, стр. 704; Стройиндустрия, № 10, 1936, стр. 4.

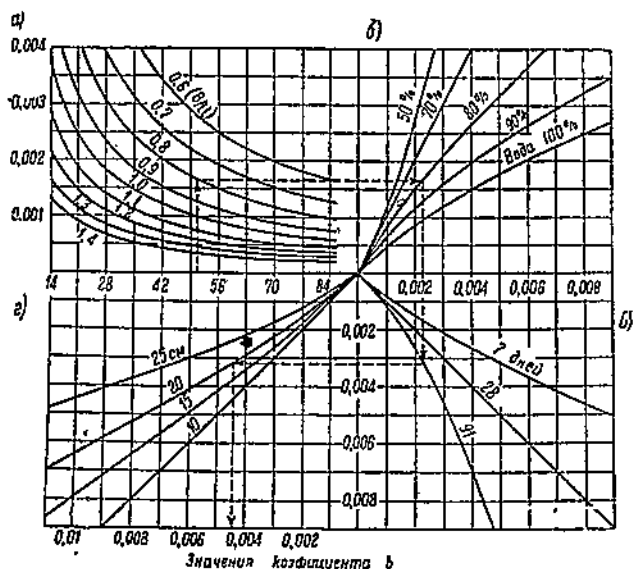


Рис. 27. Сводная диаграмма ползучести (по Россу). Пользоваться при заполнителе из гранита или гравия.

При песчаном заполнителе прибавлять 0,2 к W/C . При известняковом заполнителе вычитать из W/C 0,3. а — ползучесть в зависимости от напряжений и W/C ; б — ползучесть в зависимости от возраста в момент нагружения; г — ползучесть в зависимости от диаметра образца в см.

dF_c — приращение напряжения за бесконечно малый период dt ;

t_1 — время нахождения под нагрузкой.

Напряжение $F_c = E_c' e$.

$$dF_c = \left[\frac{dE_c'}{dt} e + \frac{de}{dt} E_c' \right] dt. \quad (19)$$

Подставляя это значение в формулу (18), получаем дифференциальное уравнение Фриденсона

$$e = \frac{F_{oc}}{E} + \int_0^{t_1} \frac{1}{E_c'} \left[\frac{dE_c'}{dt} e + \frac{de}{dt} E_c' \right] F(t) dt. \quad (20)$$

Для решения его необходимо установить экспериментальным путем зависимость эффективного модуля упругости и ползучести от времени при переменном напряжении. Сейчас таких данных в нашем распоряжении не имеется, но опыты в этом направлении поставлены. Структура уравнения не вызывает возражений, решение его желательно для установления более точного закона развития ползучести.

6. Заключение

В заключение данного обзора отметим, что, несмотря на сравнительное обилие экспериментальных данных по ползучести бетона и железобетона, до настоящего времени еще не вскрыта подлинная физическая сущность ползучести, не найдена связь этого явления с процессом твердения цемента и всеми физико-химическими явлениями, с ним связанными. Капиллярные явления безусловно играют большую роль в общем ходе явления ползучести, как и во внешне родственном явлении усадки. Однако нельзя ставить знак равенства между сущностью этих двух явлений.

К такому выводу приходит в заключение своих больших опытов Дютрон, и автор с ним согласен. Отмеченное различие ползучести при разных цементах и заполнителях не имеет еще бесспорного объяснения.

О том, что ползучесть объясняется не только капиллярными явлениями, говорит хотя бы тот факт, что аналогичными свойствами обладают бакелит и металлы при высоких температурах, что нельзя объяснить капиллярным подсосом. В оценке усадки также имеется целый ряд противоречий. Явления усадки и ползучести безусловно связаны с различиями в микроструктуре цементного камня с ее изменениями во времени. Влияние арматуры на ползучесть и усадку имеет достаточно удовлетворительное объяснение. По мнению автора, необходимо с подобными же соображениями подходить к оценке влияния характера заполнителей на ползучесть, однако учитывая при этом и влияние поверхности заполнителя. Для вскрытия сущности ползучести надо заняться изучением адсорбционных явлений и других вопросов коллоидной химии.

В отношении математической интерпретации явления ползучести и учета его при расчетах конструкций также сделано сравнительно

100-дневного; предложен ряд формул, достаточно удовлетворительных данными для практического пользования, особенно если учесть ряд других случаев словностей расчета. Однако и здесь тоже не сказано обобщающего слова, хотя, по мнению автора, в этом отношении имеется возможность найти вполне удовлетворительные решения для отдельных характерных в статическом отношении разновидностей конструкций.

Неодинаково значение ползучести в работе сооружений. Наибольшее значение ползучести имеет в статически неопределимых конструкциях: в массивах, рамах, арках, неоднородно напряженных элементах.

Сейчас еще недостаточно подтверждено влияние ползучести на начальные напряжения и на появление трещин в балках.

Совершенно иная картина наблюдается в бетоне раннего возраста, как это выявилось в наших опытах. Вместе с тем, в ряде случаев ползучесть проявляется в раннем возрасте, ибо в бетоне напряженное состояние по существу создается почти сразу после его укладки. Очень важно учесть ползучесть в массивах, при скоростном строительстве, восстановительных работах, сверххранной распалубке, напряженном армировании и в других случаях.

Опытные данные позволяют установить, что главнейшими факторами, влияющими на ползучесть, являются сорт и активность цемента, вид заполнителя, водоцементный фактор, гигрометрическое состояние среды твердения бетона, возраст к моменту нагружения.

В заключение отметим меры, позволяющие увеличить или уменьшить ползучесть. Для увеличения ползучести следует применять медленно твердеющие, смешанные цементы, бетоны с большим V/C и расходом цемента, не прибегать к воздушной среде твердения, раньше нагружать бетон, заставляя его твердеть под нагрузкой. Для уменьшения ползучести, что крайне важно при применении напряженного армирования, следует повышать плотность бетона, снижать V/C , прибегать к механизированным способам укладки (вибрации, прессованию, вакуумированию), применять быстротвердеющие цементы, выдерживать бетон в водной среде.

Данный обзор является первой, вступительной частью исследований, проводимых автором в механической лаборатории ЛИИЖТ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
И. М. Беляев. Прочность и пластичность бетона	4
И. П. Александрин. Прочность бетона в зависимости от рода каменного заполнителя	9
И. Г. Корсаков. Исследование прочности и упругих свойств бетона	26
И. В. Саталкин. Ползучесть бетона	56

Отв. редактор *П. С. Яковук*

Подписано к печати 12/III 1941 г. Уч.-авт. лист. 6,9. Печатных лист. 5⁷/₈.
 Коллич. тип. знаков в печ. л. 50 000. Тираж 3000. Заказ № 6375. М 39099.
 Цена 3 руб. 85 коп.

1-я тип. Машгиза НКТП, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.