

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства"  
(ПГУАС)

**И.Н. Максимова, Н.И. Макридин**

## **СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ**

Пенза 2014

УДК 620.22+621.7  
ББК 30.3+34.1Я73  
М17

Рецензенты: доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология строительных материалов и деревообработки» В.И. Калашников (ПГУАС);  
кандидат технических наук, зам. директора по качеству ООО «Строительные материалы» В.Ю. Нестеров

**Максимова И.Н.**

М17 Строительное материаловедение конструкционных легких бетонов: моногр. / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 204с.  
ISBN 978-5-9282-1130-1

Приведен ретроспективный анализ научных представлений о становлении и развитии строительного материаловедения легких бетонов конструкционного назначения на искусственных пористых заполнителях с учетом взаимодействия и взаимовлияния двух пористых систем структуры бетона (цементный камень и пористый заполнитель) в процессе влагообмена и влажностных деформаций между этими структурными элементами, оказывающих взаимовлияние на механическое поведение легкого конструкционного бетона на диаграмме его нагружения.

Монография подготовлена на кафедрах «Управление качеством и технология строительного производства» и «Технология строительных материалов и деревообработки» и предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся изучением и разработкой композитных строительных материалов, студентов, аспирантов обучающихся по направлению 08.03.01, 08.04.01 «Строительство».

**ISBN 978-5-9282-1130-1**

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014  
© Максимова И.Н., Макридин Н.И., 2014

## ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от плотности различают бетоны особо тяжелые (плотность более  $2500 \text{ кг/м}^3$ ), тяжелые ( $2200\text{-}2500 \text{ кг/м}^3$ ), облегченные ( $1800\text{-}2200 \text{ кг/м}^3$ ) и легкие с плотностью  $500\text{-}1800 \text{ кг/м}^3$ . К последним относят легкие бетоны на пористых заполнителях и ячеистые бетоны (газобетон, пенобетон).

Легкий бетон на пористых заполнителях применяли еще в глубокой древности. В 75-80 гг. н.э. в Риме был построен гигантский амфитеатр – Колизей, который вмещал 50 тыс. зрителей. Его фундамент выложен из бетона, приготовленного на щебне из плотной вулканической лавы, для возведения стен использован более пористый кирпичный щебень, а для сводов и между стенами – пористый легкий туф. Здание Пантеона, выстроенное в первой четверти II века нашей эры перекрыто куполом диаметром 42,7 м, верхняя часть которого выполнена из легкого бетона на пемзе, что значительно облегчило нагрузку на стены, и позволило римским строителям осуществить исключительный по смелости архитектурный замысел. Прошло 18 столетий, прежде чем появились здания с куполом большего диаметра из железобетона.

Развитие мирового строительства неразрывно связано с нарастающей тенденцией применения строительных материалов и конструкций, обеспечивающих значительное снижение массы зданий и сооружений. Одно из ведущих мест здесь принадлежит легким бетонам, которые, в свою очередь, могут успешно развиваться только при наличии достаточно развитой и совершенной сырьевой базы, включая пористые заполнители.

Традиционным пористым заполнителем для России является керамзитовый гравий. Несмотря на существенное уменьшение выпуска, он продолжает занимать в России ведущее место среди пористых заполнителей. Между тем в ведущих зарубежных странах уже с середины 70-х годов прошлого века строительство керамзитовых предприятий прекращено. Но продолжают строить предприятия пористых заполнителей, в качестве исходного сырья использующих различные отходы промышленности, в том числе доменные шлаки, золошлаковые отходы тепловых электростанций, отходы угледобычи и углеобогащения. Это позволяет не только улучшить экологическую обстановку путем утилизации отходов производства и сокращения земельных угодий на разработку карьеров и складирование отходов, но в ряде случаев существенно повысить эффективность производства пористого заполнителя за счет сокращения расхода топлива.

В табл. 1 приведен объем выпуска пористых заполнителей в последние годы существования Советского Союза по данным Госкомстата СССР и в России.

Т а б л и ц а 1

Выпуск пористых заполнителей в СССР и России

Заполнитель	Всего в СССР, тыс. м <sup>3</sup>			Всего в России, тыс. м <sup>3</sup>			
	1985 г.	1989 г.	1990 г.	1985 г.	1989 г.	1990 г.	2007 г.
Все пористые заполнители, в том числе:	44103	52248	49610	22636	27768	26164	9020
природные	7008	7145	7512	600	600	550	260
искусственные	37006	45001	42000	22636	27768	26164	8760
в том числе:							
керамзит	30945	394124	36763	19138	24019	22892	7700
шунгизит	791	951	867	791	951	867	-
аглопорит	801	883	870	227	240	233	-
перлит	2215	2414	2089	1509	1558	1303	450
шлаковая пемза	1987	1073	963	830	850	728	460
зольный гравий	43	24	24	43	24	24	30
зольный аглопоритовый гравий	102	173	193	-	-	-	-
термолит	36	24	17	36	24	17	20
Прочие	88	102	98	88	102	98	100

Максимальный выпуск пористых заполнителей достигнут в 1989 г. Всего в СССР в том году было произведено 52,25 млн м<sup>3</sup> заполнителей, в России – 27,7 млн м<sup>3</sup>, в том числе – 24 млн м<sup>3</sup> керамзита. С 1990 г. происходит снижение выпуска пористых заполнителей, вначале медленными темпами, начиная с 1996 г. – ускоренными. Примерная структура применения пористых заполнителей в различных сферах народного хозяйства в 80-х гг. и в настоящее время приведена в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Структура выпуска и применения пористых заполнителей в России

Область применения	Объем применения, %	
	80-е гг.	2000-е гг.
Теплоизоляционные засыпки	18-22	35-45
Легкие бетоны, в том числе:	78-80	40-60
стенные панели	36-38	5-10
стенные блоки	23-25	10-15
перегородочные плиты	8-10	10-15
монолитные конструкции	0,2-0,4	5-10
легкобетонные армированные изделия	11-13	10-15
Прочие сферы народного хозяйства	0,4-0,6	5-10

Почти 65-70 % выпуска заполнителей в 80-е годы уходило на изготовление однослойных ограждающих конструкций: панелей, блоков толщиной 40-60 см с термическим сопротивлением 0,9-1,5 м<sup>2</sup> °С/Вт. После выхода Постановления Совета Министров России №18-81 от 11.08.1995 г. «Об изменении № 3 СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника», направленного на повышение уровня тепловой защиты зданий, положение дел с использованием пористых заполнителей и легких бетонов в строительстве резко изменилось. С 1996 г. жилые и общественные здания строят с использованием в качестве ограждающих конструкций трехслойных стеновых панелей с так называемыми «эффективными» утеплителями и наружными слоями из армированного тяжелого или конструкционного легкого бетонов. Широко применяют сложные стеновые конструкции с применением кирпича и эффективных утеплителей. Потребность в легких бетонах и пористых заполнителях, как стеновых материалах, резко падает. В настоящее время их производят не более 30% от выпуска 1989 г.

Авторы монографии полагают, что современный уровень развития легкобетонного строительства и связанный с ним уровень производства пористых заполнителей не отражают «строительные» и прочие возможности этих материалов. Пористым заполнителям и легким бетонам на их основе уготована более весомая роль в строительном деле будущего.

В развитие теории и технологии легкого бетона и железобетона большой вклад внесли основоположники отечественной школы легкобетонного строительства, к которым, в первую очередь, нужно отнести Н.А. Попова, М.З. Симонова, И.А. Иванова, И.Н. Ахвердова, Г.А. Бужевича, А.И. Ваганова, Ю.Е. Корниловича, Б.Г. Скрамтаева, Н.Я. Спивака, В.Г. Довжика, С.П. Онацкого, М.И. Рогового, В.П. Петрова и многих других. Широкую известность получили работы зарубежных ученых: Дж.А. Хансена, Бен У. Гервика (США), Д.К. Тейчинне, З. Шорта (Великобритания), Ж. Леви (Франция), Ф. Крумла (Чехословакия).

Преимущества искусственных материалов могут быть эффективно реализованы, если будут известны пути получения их с заданными свойствами. От того, каковы будут прочность, объемная масса, зерновой состав, форма зерен и другие характеристики пористых заполнителей, – зависит и возможность изготовления легкого бетона с заданной прочностью при наименьшей объемной массе и с наименьшим расходом цемента.

В монографии излагаются физико-химические основы формирования структуры пористых заполнителей и легких бетонов и их свойства. Освещаются взаимосвязь свойств с составом и структурой, в том числе между свойствами легких бетонов и пористыми заполнителями. Достаточно подробно рассмотрены вопросы формирования структуры пористых заполнителей и легких бетонов различного назначения, включая определение силовых и энергетических критериев разрушения бетонов, уточнены показатели ряда свойств легких бетонов.

# 1. СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

## 1.1. Развитие воззрений на формирование структуры и прочности легких бетонов

Из всех стран мира наиболее широкое применение легкий бетон получил в СССР. В последние годы достигнуты значительные успехи в производстве искусственных пористых заполнителей и сборных железобетонных конструкций на их основе. Общая мощность предприятий по производству керамзита, аглопорита, шлаковой пемзы и вспученного перлита в нашей стране в 1966 г. составила 10 млн. м<sup>3</sup>. В 1963 г. мощность таких предприятий составила около 6,5 млн.м<sup>3</sup>.

В современном отечественном строительстве из легких бетонов на пористых заполнителях помимо панелей наружных стен жилых и гражданских зданий весьма широко изготавливаются также ограждающие и несущие конструкции промышленных зданий.

Легкие бетоны начали применять в мостостроении, судостроении и в других областях строительства.

Использование конструктивных легких бетонов в несущих и особенно изгибаемых конструкциях дает большой экономический эффект.

Применение легких высокопрочных бетонов, объемным весом 1700-1800 кг/м<sup>3</sup>, вместо обычного тяжелого бетона дает возможность снизить собственный вес конструкций на 25-30 %. Это открывает новые резервы извлечения экономического эффекта в строительстве.

Следует отметить также, что производство искусственных пористых заполнителей можно организовать из местного сырья, особенно в районах, где нет природных заполнителей. Это даёт дополнительную экономию средств, расходуемых на перевозку щебня по железной дороге.

Хотя эффективность применения легких бетонов на пористых заполнителях и доказана многолетним опытом строительства, – многое еще не вполне ясно в формировании их физико-механических свойств.

Удовлетворение требований, предъявляемых к прочности бетона, является одним из основных критериев его качества. Как известно, раньше существовал большой разрыв в показателях прочности легких и тяжелых бетонов, так в 1946-51 гг. прошлого столетия предельная прочность легких бетонов принималась не более 150 кг/см<sup>2</sup>, но уже в проекте «Урочного положения» – 1952 г., предусматривалось повы-

шение марки легкого бетона до 300, это положение зафиксировано и в действующих СНиП. Данные экспериментальных и опытных работ, а также заграничная практика, показывают, что прочность легких бетонов может быть повышена до 500-600 кг/см<sup>2</sup>. Следовательно, разрыв в показателях прочности легких и тяжелых бетонов имеет в перспективе дальнейшее уменьшение.

Рассмотрим, в связи с этим, некоторые особенности формирования структуры и прочности легких бетонов.

Отмеченный процесс повышения прочности легких бетонов развивался на базе успехов промышленности пористых заполнителей, качество последних значительно повысилось – возросла прочность, снизился предельный размер, повысилась их однородность. Достижения в области легких бетонов связаны и с успехами цементной промышленности – без повышения активности цемента нельзя было бы достигнуть и повышения прочности легких бетонов.

Обращаясь к теории легких бетонов, следует также исходить из особенностей как пористых заполнителей, так и цементного камня. Однако приблизиться к пониманию объективных закономерностей, от которых зависит достижение высокой прочности легких бетонов, на относительно малопрочных пористых заполнителях невозможно без изучения процессов их взаимного влияния и возможности самоизменения свойств, когда компоненты берутся в паре.

Здесь мы подходим к необходимости сформулировать свои взгляды на понятие «структура» бетона.

Основы учения о структуре легких бетонов заложены проф. Н.А. Поповым. В своих трудах «Производственные факторы прочности легких бетонов», «Легкобетонные камни и блоки» он еще в 30-е годы XX века сформулировал теорию зависимости легких бетонов от их структуры. Понятие «структура» в то время относилось к макро-старению бетонов и рассматривало их объемный вес, пористость, прочность и теплопроводность в зависимости от ряда технологических факторов.

Профессором И.Н. Ахвердовым проведены важные исследования в области формирования структуры и прочности легких бетонов. Рассматривая бетон как конгломерат, И.Н. Ахвердов [1] полагает, что «... в идеале бетон должен быть однородным материалом, в котором цементный камень и зерна заполнителя составляют сплошной монолит... Искусственный камень, в котором трудно различить границы раздела между отдельными составляющими», а «... в качестве идеаль-



ной модели должен быть принят на пористом заполнителе ноздреватой структуры (типа аглопорита)».

Сущность формирования структуры и свойств бетона рассматриваются им в зависимости от структуры цементного камня при различных В/Ц отношениях, влияния физико-химических процессов, реологических свойств, а также фазовых превращений.

На основании проведенных исследований И.Н. Ахвердов делает вывод, «... что прочность легких бетонов зависит в основном от активности цемента и пористости всей системы, которую, как и для обычных бетонов, предопределяет (В/Ц)».

В пятидесятых годах XX века проф. А.И. Ваганов провел значительные исследования по изучению высокопрочного керамзитобетона, он разработал ряд положений теории прочности легкого бетона, исходя из совместной работы крупного пористого заполнителя и растворной части бетона [2, 3].

В своих работах А.И. Ваганов указал на существование предельной прочности легкого бетона, которая лимитируется прочностью и концентрацией крупного заполнителя. По его мнению, для каждого вида заполнителя существует некоторая прочность, дальнейшее повышение которой возможно лишь в сравнительно небольшой степени при весьма значительном перерасходе цемента. Помимо влияния вида пористого заполнителя, на предел прочности легкого бетона может оказать влияние содержание заполнителя в  $1 \text{ м}^3$  бетона, определяемое величиной  $\gamma$ , его зерновым составом и предельной крупностью; т.к. модуль деформации пористого заполнителя меньше модуля деформации раствора, то с увеличением  $\gamma$  предел прочности легкого бетона уменьшается.

Прочность керамзитобетона А.И. Ваганов в своих исследованиях не рассматривал в зависимости от прочности керамзита. Эта связь была выражена через деформативные характеристики бетона. Говоря о формировании структуры и прочности керамзитобетона, А.И. Ваганов подчеркивал, что «в легком бетоне растяжимость заполнителя является постоянной, а растяжимость раствора переменной, непрерывно возрастающей величиной». На наш взгляд, это положение А.И. Ваганова требует дальнейшего развития, и будет показано ниже.

Проф. Б.Г. Скрамтаев внес большой вклад в разработку теории прочности бетонов, в исследования по технологии и свойствам крупнопористых бетонов и новых видов легких бетонов [4].

Проф. М.З. Симонов провел большие работы по изучению структуры легких бетонов на природных пористых заполнителях [5, 6].

М.З. Симоновым было подробно исследовано влияние самовакумирования, при соответствующих В/Ц цементного теста, положительно сказывающегося на увеличении прочности легкого бетона.

В исследованиях Ю.Е. Корниловича и его сотрудников [7, 8] показано дальнейшее развитие представлений о структуре легкого бетона.

Корнилович Ю.Е. и Вержбецкая М.Г. [6, 7] полагали, что в формировании структуры и прочности легких бетонов взаимное влияние структурных элементов проявляется в том, что предельные деформативные характеристики пористого заполнителя и окружающего его раствора становятся очень близкими. Это положение Ю.Е. Корниловича подвергалось критике со стороны А.И. Ваганова [3]. Исследуя деформации структурных элементов бетона при одноосном сжатии, Ю.Е. Корнилович и Ю.Д. Нациевский [8] показали, что предельные деформации от продольного сжатия и поперечного расширения опочного щебня превышают предельные деформации отдельно испытанной опоки примерно на одну треть. Эти экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами, полученными в наших исследованиях, что будет показано ниже.

На основании опытов Ю.Е. Корнилович и Ю.Д. Нациевский делают вывод, «... что разрушение легкого бетона имеет одну стадию и происходит вследствие одновременного, а не последовательного разрушения цементного камня и заполнителей».

В своих исследованиях Ю.Е. Корнилович также показал, что главным фактором прочности бетона является активность вяжущих, выражаемая в виде показателей их адгезионных и когезионных свойств.

Бужевичем Г.А. [9] было проведено комплексное исследование свойств и технологии изготовления крупнопористого бетона на пористых заполнителях. Исходя из полученных экспериментальных данных, он отмечает, что «... свойства крупнопористого бетона в принципе зависят от тех же факторов, что и свойства плотных бетонов: от вида заполнителя, расхода их на  $1 \text{ м}^3$  бетона, способов приготовления и укладки бетонной смеси, условий твердения и др. Однако, влияние этих факторов в случае крупнопористых бетонов на пористых заполнителях несколько специфично».

Спивак Н.Я. [10], изучая влияние структуры керамзитобетона на его основные свойства говорит, что «... структура легкого бетона заданной марки (прочность на сжатие) при прочих равных условиях может быть задана зерновым составом заполнителя и отношением

$\frac{m}{m+k}$ , в котором  $k$  – сумма пофракционных насыпных объемов крупного заполнителя;  $m$  – насыпной объем мелкого заполнителя,  $\frac{m}{m+k}$  – доля мелкозернистой составляющей в сумме пофракционных объемов мелких и крупных заполнителей, характеризует структуру легкого бетона».

Ицкович С.М. [11], исследуя прочность аглопоритобетона с межзерновой пористостью, отмечает, что «прочность аглопоритобетона, равно как прочность составляющих его компонентов – цементного камня и аглопорита, при прочих равных условиях определяются относительной плотностью, а также характером пористой структуры».

Рядом исследователей было показано формирование прочности легкого бетона во времени. Так А.И. Ваганов отмечает: «нарастание прочности керамзитобетона с увеличением возраста прекращается после того, как керамзитобетон достигает предельной прочности» [3].

Ашрабов А.Б. и А.И. Добродеев: «Керамзитобетоны, изготовленные на керамзите низкой марки, набирают прочность во времени менее интенсивно» [12].

Ицкович С.М.: «чем выше марка аглопоритобетона, тем менее благоприятен прогноз роста его прочность во времени» [11].

Рост прочности обычных тяжелых бетонов, как правило, выражают зависимостью, предложенной Б.Г. Скрамтаевым,

$$R_T = R_{28} \frac{\log T}{\log 28}. \quad (1)$$

Исследования проф. А.И. Иванова и его сотрудников [13-16] посвящены структуре легкого бетона. Для изучения структуры ими была предложена модель легкого конструктивного бетона и методике исследования на ней сложного напряженного состояния пористого заполнителя контактирующим цементным камнем. В их исследованиях показано влияние формы и поверхности пористого заполнителя на структуру бетона. Опытные данные [13] позволили им сделать вывод о том, что высокая прочность бетона на пористых заполнителях различного вида достигается разными путями. При использовании керамзита получить прочность выше «предельной», по А.И. Ваганову, можно при условии снижения степени насыщения заполнителем – в случае применения аглопорита повышения прочности можно достичь как повышением количества раствора, так и увеличением его прочности. Для объяснения этого положения они исходят из представлений

о концентрации напряжений (на стадии предельных деформаций) в зоне контакта «раствор-заполнитель». В керамзитобетоне в результате резко выраженной границы «раствор-гранула керамзита» происходит концентрация напряжений, в результате чего повышение прочности раствора не вызывает увеличения прочности бетона.

В аглопоритобетоне границу раздела «раствор-заполнитель» трудно различить, что соответствует идеальной модели бетона, по И.Н. Ахвердову, поэтому прочность аглопоритобетона увеличивается даже на стадии предельных деформаций самого аглопорита.

Исследованиями Малининой Л.А и Федорова В.А. [17] установлен ряд ценных положений, показывающих влияние режима термообработки легких бетонов на формирование их структуры. Их выводы о том, что «... на степень нарастания прочности легких бетонов на искусственных заполнителях, кроме температуры и продолжительности пропаривания, значительное влияние оказывает состав заполнителя, а также объемный вес свежееуложенного бетона» и «... не все закономерности, установленные для тяжелых бетонов, могут быть перенесены для пропаривания легких бетонов» – являются, безусловно, верными.

Большая эффективность пропаривания легких бетонов по сравнению с тяжелыми, по их мнению, может быть объяснена, «с одной стороны, образованием за один и тот же период большего количества новообразований с лучшим фазовым составом, а с другой, – за счет быстрого выравнивания давлений внутри образца и камеры, что не приводит к большим напряжениям, вследствие которых могут образоваться трещины».

Сделанный нами обзор показывает, что за относительно небольшой период воззрения на структуру легкого бетона имели существенное развитие. Теоретические и производственные представления о макроструктуре легких бетонов, разработанные Н.А.Поповым, получили дальнейшее совершенствование и уточнение.

Так, А.И.Ваганов обосновал ряд положений совместной работой крупного пористого заполнителя и растворной части бетона.

Симонов М.З.установил и экспериментально изучил явление миграции влаги в системе «пористый заполнитель – цементное тесто», названное им «самовакумирование».

Корниловичем Ю.Е. выполнены исследования структуры и прочности легких бетонов, исходя из взаимного влияния структурных элементов, в частности, равенства предельных деформаций их на стадии разрушения.

Ахвердов И.Н. с учениками, как бы завершая этот процесс развития представлений о структуре, обосновывает необходимость изучения легких бетонов, исходя из законов изменения пористости конгломератной системы.

При этом достоинством его исследований являются усилия, в равной степени направленные на изучение как структуры цементного камня, так и пористых заполнителей.

Последовательно развиваясь, отмеченные особенности теории легких бетонов объективно были вызваны требованиями повышения прочности и надежности соответствующих строительных конструкций.

Постоянное повышение требований к прочности легких бетонов, при ограниченном резерве повышения прочности пористых заполнителей, вызывает необходимость дальнейшего углубленного развития существующих представлений о структуре.

Для легкого бетона понятие «структура» должно исходить, прежде всего, из наличия сложной и постоянной взаимосвязи составных частей между собой, а эта взаимосвязь, вместе с характеристиками исходных материалов, определяет уже строение легкого бетона. Известно, что неоднородность бетона, как конгломератного материала, принимается за объективный фактор, но взаимное влияние составных частей (заполнитель, раствор, цементный камень) не всегда учитывается. Свойства бетона в этом случае изучаются, воспринимаются и регламентируются как конечный результат указанных взаимосвязей, без должной ясности и понимания природы действующих факторов.

Изменить это положение при изучении структуры возможно, но для этого требуется к существующим представлениям о двух различных исходных материалах для бетона (заполнитель и раствор) подключить новое представление об их взаимодействии и взаимном влиянии.

С этих позиций мы будем стремиться связать свойства бетона не только со свойствами отдельно взятых компонентов, но также и с возможностью самопроизвольного изменения этих свойств, когда компоненты берутся в паре.

Успешное развитие сформулированной идеи возможно лишь при квалифицированном понимании природы цементного камня. Не ставя перед собой широкую задачу – рассмотрения изменяющихся свойств цементного камня в свете всех современных воззрений на процессы твердения, сделаем лишь краткий обзор работ тех авторов, которые непосредственно связаны с направлением нашего исследования.

Цементный камень состоит в основном из коллоидной массы – геля, и пронизывающего гель кристаллического сростка. Он является трехфазной системой (твердая фаза-вода-воздух) и, согласно классификации А.В. Лыкова, его можно считать капиллярно-пористым телом.

Пауэрс и Брауньярд [18] характеризуют цементный камень следующим образом: цементный гель – это один из компонентов цементного теста. Другим компонентом является остаточное пространство, первоначально заполненное водой и не занятое гелем. Это пространство называется капиллярами или капиллярными пустотами. Свойства цементного геля и степень его «разбавления» капиллярными пустотами, а также поведение воды в порах геля и капиллярах – все эти факторы определяют важнейшие характеристики бетона.

Структура цементного камня определяется в основном следующими факторами: минералогическим составом и дисперсностью цемента, водоцементным отношением, технологическими особенностями приготовления и упрочнения и, наконец, температурно-влажностными условиями твердения.

Исследованию структуры цементного камня посвящены работы В.Н. Юнга, В.А. Кинда, В.Ф. Журавлева, П.П. Будникова, Ю.М. Бута, П.А. Ребиндера, И.Н. Ахвердова, Л.Е. Шейкина, С.Д. Окорокова и др.

В настоящее время нет общепризнанной научной теории, которая исчерпывающе объясняла бы механизм образования новых соединений и твердение вяжущих при их взаимодействии с водой [19].

Рассмотрим важнейшие моменты, приводящие к возникновению структур твердения цементного камня.

Согласно воззрениям П.А. Ребиндера, после смешивания цемента с водой в первую очередь создаются коагуляционные структуры, представляющие собой пространственный каркас из частиц вяжущего, разделенных тонкими прослойками воды. В процессе возникновения мельчайших кристаллических частиц новообразований происходит качественное изменение структуры за счет срастания возникших кристаллов гидратных новообразований и формирования кристаллизационного каркаса.

Формирование коагуляционной структуры цементного теста, по И.Н. Ахвердову [20], начинается сразу же после затворения цемента водой и продолжается в течение определенного времени, в пределах которого подготавливается переход цементного теста (упруго-пластично-вязкой системы) в твердое кристаллическое тело. И.Н. Ахвердов считает, что гидратация и твердение гидравлических вяжущих веществ

происходит по коагуляционно-кристаллизационной схеме. При этом он показал, что при прочих равных условиях физико-механические свойства бетона предопределяются коагуляционной структурой, характеризующейся остаточным В/Ц, устанавливающейся в начале схватывания цементного теста.

При изучении влияния водоцементного отношения на структуру цементного камня проф. И. Н. Ахвердов впервые указал наличие двух качественно различных структур цементного камня, плотной и рыхлой коагуляционной структуры, обусловленных, главным образом, В/Ц фактором. Он указывает, что «при значении В/Ц более определенной величины вода разрушает структурные связи и образуются отдельные группы частиц, оторванные друг от друга. В этом случае водоотделение обуславливается седиментационным процессом... В результате получается осадок, неоднородный по своей плотности, со слабыми связями между частицами, разделенными друг от друга значительными промежутками, занятыми водой. При образовании рыхлой коагуляционной структуры (в процессе седиментации) остаточное водоцементное отношение по своей величине несущественно отличается от значения В/Ц, характеризующего предел образования плотной коагуляционной структуры. В связи с этим было бы логично предположить, что и физико-механические свойства цементного камня должны соответствовать в обоих случаях друг другу, однако, это предположение, как известно, не подтверждается опытами – цементный камень с большей величиной В/Ц затворения имеет меньшую прочность. Это, в свою очередь, свидетельствует о различии в строении плотной коагуляционной структуры и рыхлой коагуляционной структуры».

Ратинов В.Б. и А.Е. Шейкин [21] отмечают, что в реальных условиях твердения цементного теста могут иметь место все перечисленные типы связи, вклад каждого из них в общую прочность структуры зависит от химико-минералогического состава цемента, водоцементного отношения (определяющего дисперсность, форму и расстояние между гидратами), количества и вида заполнителя, режимов, продолжительности твердения и других факторов.

Шейкин А.Е., изучая структуру цементного камня, связывал изменение прочности, упругости и пластичности бетона во времени со структурными изменениями в цементном камне.

В этой работе на основе существующих представлений и своих исследований он делает вывод, что «... в цементном камне образуются две основные структурные составляющие:

- 1) кристаллический сросток;
- 2) наполняющая сросток масса, представляющая собой связанную воду со взвесью из субмикроскопических кристаллов».

Существенной причиной изменения физико-механических свойств цементного камня во времени А.Е. Шейкин считает возникновение и развитие в последнем собственных напряжений и изменения качества геля.

Зависимость физико-механических свойств бетона от соотношения основных структурных составляющих цементного камня была им показана на портландцементных различного минералогического состава.

Как отмечает А.В. Волженский [19], механизм возникновения гидратных новообразований цементного камня важен не сам по себе. Важно знать, как влияет он на технические свойства затвердевшей системы (прочность, усадочные деформации, ползучесть и др.). По его мнению, прочность затвердевшего вяжущего тем выше, чем мельче слагающие его частицы, в целом цементный камень продолжает набирать прочность до того момента, когда возникновение высокодисперсных новообразований не будет перекрывать параллельно идущий процесс старения гелей.

Под «старением» гелевидной фазы понимают уменьшение её удельной поверхности и, соответственно, снижение связующей способности.

На интенсивность старения гелей оказывают большое влияние условия твердения. Так, в работе [19] показано, что образцы из цементного теста при В/Ц=0,3, характеризовавшиеся через 28 суток водного твердения при 20 °С прочностью при сжатии 900 кгс/см<sup>2</sup>, удельной поверхностью новообразований – 186 м<sup>2</sup>/г, в результате 8-и часового пропаривания при 90 °С снизили прочность до 630 кг/см<sup>2</sup>, а удельную поверхность – до 133 м<sup>2</sup>/г. Автоклавная обработка подобных же образцов 28-суточного возраста при 8 ат (изб.) (174 °С) привела к уменьшению прочности до 450 кг/см<sup>2</sup>, а удельной поверхности новообразований – до 90 м<sup>2</sup>/г. При этом степень гидратации цемента в этих условиях пропаривания продолжала расти.

Старение гелей, с одной стороны, проявляется в снижении прочности цементного камня на сжатие, а с другой – в повышении его упругих свойств.

Волженский А.В. [19] полагает, что физические, прочностные, упруго-деформативные и другие свойства затвердевших цементов, а, следовательно, и бетонов, определяются не только степенью гидратации вяжущего, как часто принимается, но и составом и тонкой



структурой новообразований, зависящими как от вида цемента, так и от условий и длительности его твердения.

«Сосуществование» цементного теста (камня) и пористого заполнителя с непрерывно протекающим процессом миграции влаги, вначале от цементного теста, а затем обратно, делает весьма существенными те явления твердения, которые оказывают влияние на свойства затвердевшего цемента, а именно, – седиментацию, самоуплотнение, контракцию, осмотическое давление, усадку и набухание.

Рядом исследователей было убедительно доказано вредное влияние седиментации и водоотделения на прочность и плотность цементного камня.

Пористые заполнители в легких бетонах отсасывают часть воды затворения и понижают таким образом водоцементное отношение. Миграция влаги из цементного теста в заполнитель способствует торможению процесса внутреннего расслаивания и качественному формированию контактного слоя цементный камень - заполнитель.

Гидратация цемента сопровождается непрерывным уменьшением воды в системе цемент - вода и увеличением содержания твердой фазы. Однако, сравнение абсолютных объемов исходной системы реагирующих компонентов и системы, возникшей при гидратации цемента, позволяет сделать вывод о явлении сжатия первоначальной системы, т.е. контракции.

Контракционный эффект оказывает значительное влияние на образование и развитие микропор в цементном камне. Б.Г. Скрамтаев с большой убедительностью показал наличие вакуума в твердеющем цементном камне, обусловленного образованием контракционных пор в последнем.

Некрасов В.В. [22], изучая контракционные явления гидравлических вяжущих и воды, полагает, что данный эффект зависит от химических процессов. В исследованиях Н.А. Мощанского [23] указывается на физико-химическую природу контракции.

Нилендер Ю.Н., изучая изменение объемных деформаций бетона от контракции, назвал их «собственно усадки». Хотя абсолютная величина «собственно усадки» или химической усадки невелика, однако в изделиях с большим расходом цемента она может привести к значительным напряжениям и деформациям цементного камня. Наряду с уменьшением истинного объема твердеющей системы, наблюдаются важные для нашего исследования явления, проявляющиеся в набухании цементного камня [21]. Ряд ученых полагает, что это

изменение объема связано с набуханием геля, в свою очередь, вызываемого действием осмотических сил.

Усадку или набухание капиллярно-пористый цементный камень или бетон претерпевает при отсутствии гигрометрического равновесия с окружающей средой.

Самопроизвольные влажностные деформации усадки и набухания цементного камня являются одной из основных причин появления в нем «собственных» напряжений. Особенно велики напряжения от усадки, которые становятся иногда выше предела его прочности на растяжение и вызывают образование микро- и макротрещин.

На усадку цементного камня и бетона влияют многие факторы: вид цемента, состав бетона, вид заполнителя, условия приготовления, массивность элемента, температурно-влажностные условия среды и др.

До настоящего времени пока еще нет общепринятой интерпретации влажностной усадки цементного камня.

Александровский С.В., Белов А.В., Михайлов В.В., Мощанский Н.А., Нилендер Ю.А., Цилосани З.Н., Шейкин А.Е., Фрейсине, Пауэрс Т., Калоусек Г., Лермит Р., Чернин В. и др. по-разному объясняют физическую природу рассматриваемых деформаций усадки и набухания.

Ряд исследователей считает основной причиной усадки цементного камня капиллярные явления, эта гипотеза предложена Фрейсине.

В исследованиях [24, 25] было показано, что капиллярные явления на процесс усадки оказывают второстепенное влияние.

Шейкиным А.Е. предложена структурная теория усадки. По его мнению, усадочные деформации цементного камня выражены тем слабее, чем меньше в его структуре гелевидных составляющих и больше кристаллического сростка (влияние химико-минералогического состава).

Принято считать, что усадка цементного камня тем больше, чем выше дисперсность цемента. Однако рядом исследований было показано, что в длительные сроки твердения показатели усадки обычно выравниваются.

Значительное влияние на усадку оказывает водоцементный фактор, а именно, с увеличением последнего усадка возрастает и наблюдается более замедленный процесс затухания усадочных деформаций [24].

Температурно-влажностные условия среды существенно влияют на значение конечной усадки цементного камня. Усадка пропаренных образцов в среднем на 30-40 % ниже усадки бетонов естественного

твердения. При автоклавной обработке снижение усадки бетона может быть более существенным.

Объясняется это «огрублением» тонкой структуры цементного камня: как частиц геля, так и других компонентов твердой фазы.

Сдерживающее влияние на усадку цементного камня оказывает заполнитель в бетоне. Оно проявляется тем сильнее, чем выше его модуль упругости.

Цементный камень при контакте с водной средой или неравновесной повышенной влажностью окружающего воздуха набухает. Набухание, как и усадка, зависит от ряда технологических и физических факторов.

Так, с уменьшением водоцементного отношения увеличивается набухание цементного камня. Показатели набухания тем больше, чем выше тонина помола цемента. Абсолютная величина набухания цементного камня значительно меньше его усадки.

Следует отметить, что при переменном насыщении и высушивании деформации набухания и усадки цементного камня постепенно затухают.

Александровский С.В. [26] полагает, что это связано с изменением структуры и физико-механических свойств бетона во времени при его старении и, в первую очередь, с развитием упругой кристаллической составляющей цементного камня и старением геля, с одной стороны, и уменьшением его пористости, с другой.

На структуру цементного камня и его прочностные характеристики большое влияние оказывает дисперсность цемента.

В исследованиях И.Н. Ахвердова указывается на изменение прочности цементного камня с увеличением тонины вяжущего. Объясняя полученные результаты, И.Н. Ахвердов вносит понятие реакционных каемок (оболочек) вокруг непрогидратированных цементных ядер. По его мнению, «новообразования являются наиболее слабым элементом структуры цементного камня и представляют собой пористое тело, прочность которого в несколько раз меньше прочности непрогидратированных зерен цемента».

Таким образом, с увеличением дисперсности цемента растут его водопотребность и реакционная способность, что способствует интенсивному накоплению наиболее слабой, с точки зрения прочности, составляющей структуры цементного камня.

Влияние удельной поверхности цемента на структуру пор цементного камня было показано в ряде исследований.

Поровое пространство в цементном камне и бетоне образуется в результате вовлечения воздуха при перемешивании бетонной смеси и ее укладке [23, 27, 28].

Пористость цементного камня составляется из микро- (капилляры  $r < 10^{-5}$  см) и макропористости (капилляры и поры  $r > 10^{-5}$  см).

По разным источникам, общий объем пор в цементном камне составляет 8-35 %.

Как известно, влажностные деформации цементного камня связаны с удалением из него влаги или, наоборот, с ее поглощением.

Процессы удаления или поглощения влаги цементным камнем приводят к перераспределению воды в последнем и возникновению различных форм ее связи с гидратными новообразованиями. Нарушение или восстановление определенных форм связи воды с цементным камнем обусловлено затратой или накоплением энергии.

Процесс удаления влаги из цементного камня происходит в несколько этапов, после испарения воды с наружных поверхностей и свободной воды наступает второй этап – удаление капиллярно-связанной и адсорбционной воды.

Александровский С.В. [26] полагает, что удаление капиллярной и адсорбционной влаги сопровождается значительным сжатием цементного камня, а составляющие этой усадки представляют в сумме так называемую влажностную усадку.

Исходя из морфологии новообразований цементного камня, необходимо отметить, что с увеличением дисперсности частиц новообразований значительно возрастает поверхность раздела твердой и жидкой фаз в цементном камне. Это приводит к увеличению адсорбционно-связанной воды поверхностью частиц, к ослаблению сил физического порядка между ними, к снижению прочности цементного камня и увеличению его ползучести.

По-видимому, для легких бетонов на пористых заполнителях, которые отличаются от обычных повышенной деформативностью, рационально создавать такие условия твердения, которые способствуют возникновению более «огрубелой» структуры цементного камня.

И, наконец, рассмотрим влияние физических явлений на структуру цементного камня с изменением температуры гидротермальной обработки и ее длительности.

Мионов С.А. [29] полагает, что «механизм твердения и изменения структуры и прочности бетона при различных температурах более сложен, чем классическое представление о процессах твердения цемента в нормальных условиях, по мере повышения или понижения

температуры все большее влияние на нарастание прочности бетона оказывают физические явления. Они могут благоприятно воздействовать на формирование плотной структуры и однородность качества бетона во всем изделии или конструкции, и наоборот, все свойства могут быть ухудшены неблагоприятными условиями твердения бетона».

На основании многочисленных исследований, проведенных в НИИЖБе, С.А. Миронову и его сотрудникам [30, 31] удалось установить основные закономерности образования структуры бетона в условиях действующего теплового градиента. Ими введено понятие начальной «критической» прочности, после достижения которой бетон способен воспринимать тепловое воздействие без нарушения структуры.

Малининой Л.А. и Федоровым В.А. [31] установлено, что деструкция цементного камня при тепловой обработке, приводящая к увеличению его пористости, обусловлена возникновением термоградиента и различными коэффициентами термического расширения составляющих бетонной смеси.

Малининой Л.А. показано влияние избыточного давления паровоздушной среды в период подъем температуры при пропаривании и запаривании – на структурообразование и прочность бетона. Опытами установлено, запаривание свежееотформованных изделий, не имеющих начальной прочности, при одновременном воздействии избыточного давления с повышением температуры паровоздушной среды приводит к сокращению размеров образцов на 2,0-2,3 мм/м.

Увеличение начальной прочности бетона приводит к снижению степени обжата его паровоздушной средой. По мнению Л.А. Малининой, обжатие бетона внешней средой приводит к существенному уменьшению деструктивных процессов в нем, что позволяет получать бетоны высокой плотности и прочности.

Таков далеко неполный обзор работ, посвященных структуре и прочности цементного камня.

Переходя к рассмотрению формирования структуры и прочности легких бетонов на пористых заполнителях, следует отметить указание И.Н. Ахвердова [1] о том, «... что бетоны на различных заполнителях имеют единую физико-химическую и физическую основу ...» и «... фактором, раскрывающим физическую общность бетона на различных видах заполнителей, является не познанный еще в должной мере закон изменения пористости бетона».

В свое время Н.А. Поповым [32] была предложена следующая классификация легких бетонов по их макроструктуре: 1) бетон слитной

(плотной); 2) пористой (малопесчаной) и 3) крупнопористой структуры; тяжелый же бетон только плотной и крупнопористой структуры.

Таким образом, имеется третья промежуточная разновидность легких бетонов по структуре, промежуточная между слитной (плотной) и крупнопористой, когда количества растворной части, а, в частности, песка, – не хватает на полное заполнение межзернового пространства в крупном заполнителе.

В связи с наличием разных представлений и нашего понимания рассматриваемой проблемы, необходимо учесть то, что все сказанное выше относится к легким бетонам только плотной структуры. Именно для такого вида бетона могут быть установлены объективные закономерности связи: структура-свойства. Лишь после этого откроются возможности распространить указанные закономерности (при соответствующей их доработке и уточнении) на бетоны поризованные и крупнопористые.

Переходя к рассмотрению прочности, следует отметить, что проблема прочности легких бетонов не может рассматриваться обособленно от тяжелых. Одним из аспектов этой проблемы является вопрос прочности заполнителя.

Впервые научно обоснованные требования к прочности заполнителя были сформулированы Б.Г. Скрамтаевым [33]. Ряд последующих исследований и практика строительства подтвердили правильность предложенного им показателя прочности заполнителя, равного 1,2 прочности бетона.

Однако, анализируя литературные данные о наименьшей прочности заполнителей, необходимо отметить определенную противоречивость высказанных взглядов.

Так, Н.А. Житкевич в своей работе [34] указывает, что «... материалы, применяемые как отошчающие вещества для бетона, должны обладать не меньшей крепостью, чем требуемая крепость приготовленного из них бетона».

Александрин И.П. [35], занимаясь исследованием зависимости прочности бетона от рода каменного заполнителя, констатирует, что данные его опытов «... не позволяют установить каких-либо закономерных связей между характеристиками каменного заполнителя и бетона... Это лишний раз подтверждает трудность обобщенного, но практически точного определения размеров влияния качества одного из компонентов бетона...».

Свечин Н.И. [36], анализируя данные своих опытов и других исследователей, также приходит к выводу, что «... нет практической

возможности в обычных условиях установить числовую зависимость между прочностью бетона и прочностью заполнителя».

Френкель И.М. [37] отмечает, что применение в качестве заполнителя щебня из очень твердых высокопрочных пород нецелесообразно. Его вывод основан на том, что наибольшая прочность бетона обеспечивается при достижении максимальной однородности системы, когда деформативные свойства компонентов бетона близки между собой.

Положение И.Н. Ахвердова, определяющее прочность бетона, также базируется на максимальной однородности его структуры [1].

По мнению С.С. Гордона [38], прочность бетона марок выше 200 непрерывно и заметно растет по мере роста прочности щебня.

Опытами С.М. Ицковича [39] подтверждается положение Б.Г. Скрамтаева.

Необходимость расширения сырьевой базы природных заполнителей привела к широкому использованию известняков, прочность которых нередко была такой же, как марка бетона, а в отдельных случаях даже ниже ее.

Результаты опытов Р.Л. Маиляна [40] также показывают, что прочность карбонатных бетонов на 10-20 % выше в сравнении с прочностью бетона на заполнителях из изверженных горных пород.

В работах других исследователей было показано, что прочность заполнителей неоднозначно определяет физико-механические свойства бетона на его основе.

Подтверждением этого положения могут служить диссертационные опыты А.И. Ваганова, в которых он получил керамзитобетон прочностью 440 кг/см<sup>2</sup>, и исследования последних лет по высокопрочным легким бетонам на пористых заполнителях.

Таким образом, помимо прочности заполнителей большую роль в структурообразовании и прочности бетона играет ряд других факторов, например, характер и состояние поверхности, структурные особенности, водопоглощаемость, химическое и физическое взаимодействие заполнителей с продуктами гидратации цементов.

Так, И.М. Френкель [41] и С.М. Ицкович [39] показали влияние степени сцепления раствора с заполнителем на прочность бетона. В их исследованиях раствора в качестве заполнителя применялись стальные, пластилиновые и парафиновые шары, эталонные образцы были из раствора без заполнителя. Результаты опытов свидетельствуют о том, что прочность бетона практически не зависит от прочности заполнителя, если между последним и раствором отсутствует

сцепление. Эти экспериментальные данные подтвердили мнение Н.В. Свечина [42] о том, что: «при исключении сцепления бетон начинает работать почти так, как если бы те объемы, которые занимает заполнитель, оказались вдруг пустотами».

Опыты К.А. Адамчикова [43] показывают влияние состояния поверхности заполнителя на прочность бетона. Так бетон, изготовленный на свежераздробленных заполнителях, имел прочность на 20-50 % выше, чем у бетонов на заполнителе, выдержанном некоторое время на воздухе.

Фильченков И.Ф., В.И. Галактионов, Д.В. Березин [44, 45], исследуя влияние структурных особенностей заполнителей на прочность бетона, пришли к выводу, что минералогический состав, структурные особенности горных пород существенно влияют на прочностные характеристики и деформативные свойства бетонов, особенно, бетонов марок 300. Заполнители из горных пород – стекловатой, скрытокристаллической и тонкозернистой структур, независимо от их генезиса, дают бетон с пониженной прочностью на сжатие, а также на растяжение при изгибе и расколе, по сравнению с прочностью бетонов на заполнителях из пород, имеющих мелко и среднезернистую структуру.

Из изложенного можно сделать вывод, что в вопросе ограничения прочности плотных заполнителей для бетонов нет полной ясности, и он требует дальнейшей доработки.

Переходя к рассмотрению влияния искусственных пористых заполнителей на структурообразование и прочность легкого бетона, следует отметить, что они представляют особый интерес в этом отношении в связи с широким применением легких бетонов в различных областях строительства и являются менее изученными.

Многочисленными исследованиями показано, что прочность при сжатии тяжелого бетона, в основном, определяется прочностью раствора или зоной контакта его составляющих, в случае легкого бетона – это, как правило, пористые заполнители.

Прочность тяжелого бетона имеет корреляционные связи с водоцементным отношением, активностью цемента и его расходом. Степень влияния первых двух факторов велика и ее характер установлен многими исследованиями. По расходу цемента, который, по существу, характеризует толщину обоймы вокруг крупного заполнителя, имеются противоречивые взгляды.

В работах [46, 47] показано, что прочность высокопрочных бетонов с увеличением расхода цемента более 500 кг/м<sup>2</sup> при том же В/Ц значительно уменьшается.



Однако, анализируя многочисленные работы, можно проследить достаточно четко проявляющуюся закономерность. Сущность ее заключается в том, что по мере раздвижки зерен крупного заполнителя их прочность оказывает все меньшее влияние на прочность бетона.

Логичность этой закономерности вполне очевидна, поскольку при малых расходах цемента и минимальной толщине обоймы бетон представляет собой каркас из заполнителя, пустоты которого заполнены цементным раствором. При такой структуре прочность заполнителя играет важную роль, и она должна существенно превышать требуемую марку бетона.

По мере повышения расхода цемента и увеличения количества раствора (очень жирные, малопесочные растворы имеют свои недостатки), каркас заполнителя, как таковой, перестает существовать, структуру бетона можно характеризовать «плавающим» заполнителем – по терминологии И.М. Френкеля [37], и доминирующая роль в этом случае переходит к прочности раствора и его сцеплению с заполнителем.

К такой категории относятся конструктивные легкие бетоны и бетоны на малопрочных известняковых заполнителях.

Следует полагать, что названные бетоны имеют высокую величину прочности за счет перераспределения функций между заполнителем и раствором. Именно высокопрочный раствор начинает выполнять функции каркаса (обоймы), и за счет повышенных сил сцепления с заполнителем обеспечивает монолитность конгломерата.

Было бы, однако, ошибкой думать, что прочность заполнителя при такой структуре бетона настолько незначительна, что его (заполнитель) можно низвести до состояния замкнутых воздушных пор (ячеистые бетоны).

В этом случае усиливающаяся концентрация напряжений на грани «малопрочный заполнитель – высокопрочный раствор» ведет к возрастанию потерь преимуществ конструктивных легких бетонов.

Достаточно полно роль пористых заполнителей, с этих позиций, рассматривается в исследованиях И.Н. Ахвердова и С.М. Ицковича.

Описанная картина явлений должна объяснять необходимость высказываемых сейчас требований к повышенной прочности пористых заполнителей.

## 1.2. Роль искусственных пористых заполнителей в процессе структурообразования и достижения высокой прочности легких бетонов

Роль пористых заполнителей в создании определенной структуры, а через нее, заданных свойств легких бетонов, – двойка.

Во-первых, они поризуют бетон, – облегчая этим его вес.

Во-вторых, заполнители определяют границы достижимости определенной прочности и деформативности конгломерата.

Было несколько этапов в развитии легких бетонов. Их содержание определялось преобладающим мнением об основном назначении легких бетонов в строительной практике. На первом этапе основное назначение усматривалось в выполнении функций ограждающих конструкций. В этот период господствовала тенденция эффективности всемерного снижения объемного веса бетона и поэтому особых требований к его прочности не предъявлялось. Более того, они, по существу, и не могли быть предъявлены, поскольку с повышением пористости заполнителя возрастает неоднородность в системе заполнитель-цементный камень, а это ведет к резкому снижению прочности материала.

В этот период керамзитобетон был преобладающим (каким он собственно является и сейчас), но необходимость требований к его прочности тогда еще не возникла.

Увлечение идеей снижения объемного веса приводило некоторых авторов (Н.Я. Спивак) даже к парадоксальным утверждениям о том, что экономическая целесообразность и снижение требований к прочности – есть две стороны одного и того же процесса, повышения эффективности легкого бетона.

Второй этап связан с расширением области применения бетонов и повышением марки легких бетонов и вызвал необходимость решения двух задач:

- 1) повышение однородности пористого заполнителя;
- 2) повышение прочности пористого заполнителя.

Исследования А.И. Ваганова [2, 3] были знаменательны тем, что он в период всеобщего увлечения задачей снижения объемного веса керамзитобетона занялся развитием положений, объясняющих закономерности его прочности, исходя из характеристик деформативности компонентов.

Собственно, его работы, а также исследования И.Н. Ахвердова и его школы и положили начало второго этапа. Следует напомнить, что сделанный А.И. Вагановым шаг вперед в области легких бетонов был

подготовлен объективными условиями, вытекающими из задачи применения специальных бетонов в судостроении. Здесь, как известно, облегчение веса не играет главенствующую роль, на первый план выступают прочность и долговечность.

Принимая пористость за фактор, предопределяющий изменение всех свойств легких бетонов, следует определить наше отношение к роли каждого компонента бетона. Базируясь на данных многих авторов, нужно признать, что легкий бетон представляет собой совокупность двух пористых сред, а именно цементного камня и пористого заполнителя. Если поры заполнителя стабильны, то поры цементного камня изменчивы. Поскольку в формировании структуры легкого бетона явления массопереноса имеют существенное значение, длительное изменение пористости одного из компонентов неизбежно сказывается на этом процессе и на свойствах легкого бетона.

### 1.2.1. Влияние вида и строения пористых заполнителей

Зависимость прочности при сжатии тяжелого бетона в основном определяется прочностью раствора:

$$R_B = f(R_p), \quad (2)$$

и эта зависимость близка к прямолинейной.

Для керамзитобетона аналогичная зависимость сохраняется лишь до определенного предела. Затем относительное увеличение прочности бетона начинает отставать от роста прочности раствора и, наконец, почти прекращается [2, 3, 39].

Ваганов А.И. [2, 3] посвятил свои работы изучению этой зависимости и объяснению роли керамзита в формировании структуры и прочности бетона. Его опытами было показано, что пористый заполнитель вносит качественно новое в процесс нарастания прочности бетона. По А.И. Ваганову, – это «предельная» прочность на данном виде заполнителя.

Ицковичем С.М. [39] показано, что зависимость прочности аглопоритобетона от прочности раствора выражается специфической кривой, отличной от кривой прочности керамзитобетона (рис.1).

Тимофеев А.И. [51], анализируя данные своих опытов и других авторов [49, 50], приходит к выводу: у легких бетонов на пористых заполнителях щебневидной формы, полученных дроблением глыб или больших фракций, нет резко выраженной так называемой «предельной прочности». По достижению предельной деформативности заполнителя наблюдается лишь снижение прочности раствора.

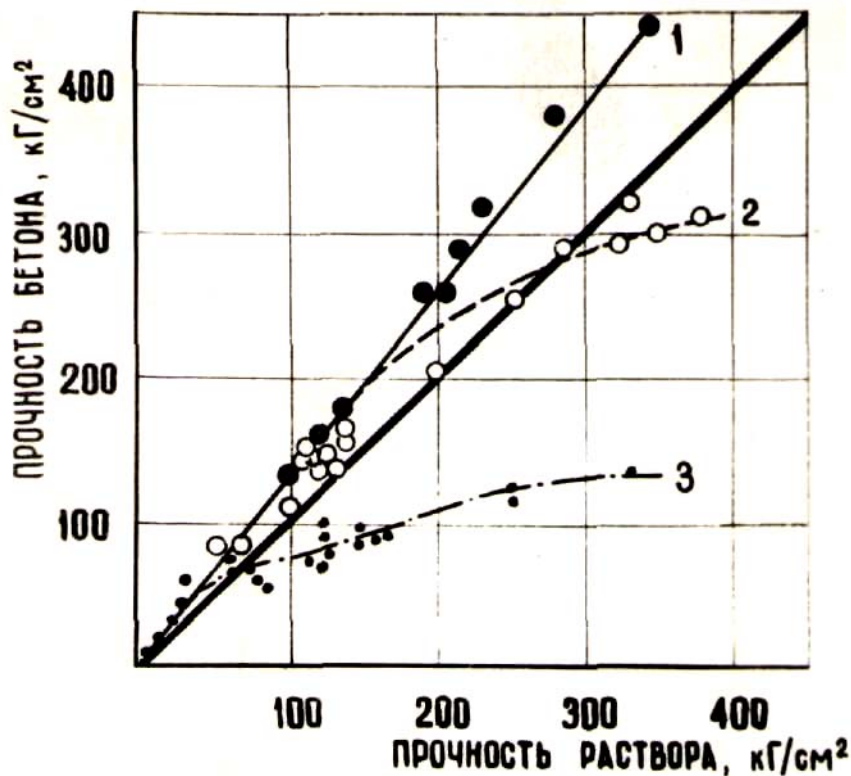


Рис.1. Зависимость прочности бетона от прочности раствора при применении в качестве крупного заполнителя гранитного щебня (кривая 1), аглопорита (кривая 2) и керамзита (кривая 3)

Следовательно, можно полагать, что «предельная» прочность легкого бетона зависит от вида заполнителя.

По внешним признакам различают два вида заполнителя: гравиевидный и щебневидный.

По итогам многочисленных исследований [38, 52], их роль в тяжелых бетонах достаточно ясна. Такого единого мнения нет в отношении бетонов легких. Отсутствие расхождений во взглядах выражается, прежде всего, при утверждении преимуществ того или иного вида заполнителя. Продолжительное время главенствующим было мнение о том, что только заполнитель окатанной гравиевидной формы может обеспечивать высокую прочность бетона при наименьшем расходе цемента.

Ряд авторов [53, 54] высказывается за преимущества керамического гравия, исходя из сопоставления результатов испытания керамзита и аглопорита по определению их объемного веса в куске и прочности в цилиндре. Действительно, аглопорит при раздавливании имеет

значительно меньшую прочность, чем керамзит, но это еще не говорит о возможной прочности бетона. В бетоне картина может быть обратной.

Диалектика действующих закономерностей такова, что преимущества того или иного вида заполнителя проявляются лишь при сопоставлении их в тех или иных граничных условиях. Именно в таком плане, и примерно в одно время, были выполнены исследования С.М. Ицковичем и А.И. Тимофеевым. Работая независимо, авторы были едины в своих выводах. Это, бесспорно, является показателем объективности и достоверности их данных.

Тимофеев А.И., работая с аглопоритом и керамзитом, полученными из одного глинистого сырья, установил, что преимущества последнего проявляются лишь в пределе требуемой прочности около 250 кг/см<sup>2</sup>. При необходимости получения более высокой прочности, аглопорит становится не только равноценным керамзиту, но и получает преимущества перед ним, в частности, по расходу цемента (прочности растворной части) на единицу прочности бетона. Причину этого следует искать в более однородных показателях пористости заполнитель - цементный камень и в меньшей степени концентрации местных напряжений. Большое значение имеет также кольматация открытых пор цементным раствором.

Внутренняя структура зерна связана с видом заполнителя. Н.А. Попов в своих исследованиях по керамзиту и керамзитобетону указывал, что на прочность керамзита сжатие оказывает большое влияние степень равномерности распределения пор и различие в их величине.

По мнению С.М. Ицковича [39], качество пористых материалов обуславливается, в основном, тремя факторами: прочностью вещества, слагающего материал, степенью поризации и видом пористой структуры.

Для оценки качества пористых заполнителей по прочности рядом исследователей были предложены различные методы. Все предлагаемые способы можно классифицировать в три группы: 1) испытание пористых заполнителей в бетоне, 2) испытание в стальном цилиндре по ГОСТ, 3) испытание отдельных гранул зерен заполнителя.

Первый способ наиболее полно отражает качество пористых заполнителей, но трудоемок и не отвечает требованиям оперативности производства.

В работе [55] на основании экспериментальных данных, полученных при испытании в бетоне аглопорита разных заводов, предлагается

следующая формула для ориентировочной оценки действительной прочности этого заполнителя в бетоне:

$$R = 150 \cdot \gamma^2, \quad (3)$$

где  $R$  – прочность зерен аглопоритового щебня при сжатии в сплошной равнопрочной среде, кгс/см<sup>2</sup>;

$\gamma$  – объемный вес зерен в куске, г/см<sup>3</sup>.

Метод определения прочности заполнителей по ГОСТ в стальном цилиндре весьма прост и удобен, но, к сожалению, этот экспресс-метод нельзя признать совершенным, т.к. получаемые прочностные характеристики менее объективны.

При изучении физико-механических свойств легкого бетона в зависимости от прочности заполнителя видна необходимость создания более совершенной методики по определению прочностных характеристик пористого заполнителя.

Необходимо отметить, что вид и строение зерен пористого заполнителя влияют не только на потребное количество цемента в бетоне, но и существенно сказываются на характере формирования контактных слоев между раствором и заполнителем. По мере снижения толщины обоймы это влияние усиливается. Воздействие двух контактных слоев как бы перекрывается.

Аракелян А.А. [56], исследуя природные пористые заполнители, указывает на трудность хорошего контакта между цементным тестом и заполнителем, имеющим сильно шероховатую поверхность, а для прочности и плотности контакта имеет решающее значение величина площадки контакта цементного камня и заполнителя.

Щебнеподобная форма крупных фракций заполнителя отрицательно сказывается на формировании прочности бетона, вследствие больших перепадов в эпюре напряжений при распределении её между раствором и крупным пористым щебнем в бетоне [51].

В Уральском ПромстройНИИпроекте [57] изучены свойства легкого бетона на основе аглопорита окатанной формы. Исследованиями показано, что такой аглопорит обладает повышенной прочностью и морозостойкостью по сравнению с обычным аглопоритом в виде щебня.

Исследованиями [56] установлено, что предпочтение следует отдавать заполнителям, имеющим мелкопористую структуру с толстыми стенками пор.

Евдокимов А.А. получил относительно большую прочность на аглопорите в сравнении со шлаковой пемзой, несмотря на то, что образцы

из пористого заполнителя, выпиленные из шлаковой пемзы, имели большую прочность по сравнению с аналогичными — из аглопорита.

Буров Ю.С. в своих опытах применял доменные шлаки разной структуры. Высокопрочные бетоны, полученные им, имели модуль упругости соответственно: на более пористом с шероховатой поверхностью отвалном шлаке —  $E=510-540 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>, на литом плотном шлаке —  $E=420-460 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>.

По-видимому, для объяснения этого факта надо исходить из различного адгезионного взаимодействия цементного камня к заполнителю в зависимости от его структурной пористости.

По мнению [58], вид крупного заполнителя влияет на сопротивление легкого бетона растяжению, причем решающее значение имеет не прочность самого заполнителя, а состояние его поверхности. Они полагают, что легкие заполнители с развитой поверхностью (например, шлаковая пемза, аглопорит) обладают лучшим сцеплением с цементным камнем, чем заполнители с гладкой поверхностью (например, керамзитовый гравий).

Иванов И.А. [16], анализируя экспериментальные данные исследований, отмечал, что «характер изменения прочности бетона и адгезии цементного камня к заполнителю различны. Если изменение прочности отдельно взятых цементного камня и заполнителя от пористости происходит однозначно, по степенной зависимости, и выражается в постоянном уменьшении прочности с увеличением пористости, то адгезия, характеризующая степень срастания, имеет экстремальное значение. В результате становится возможным наметить такую область пористости, в которой должны быть получены наиболее высокие значения как однородности, так и прочности бетона».

### 1.2.2. Влияние крупности и зернового состава пористого заполнителя

Зависимость прочности легких бетонов от зернового состава пористых заполнителей изучали ряд специалистов. В исследованиях основные свойства легких бетонов рассматриваются в зависимости от характеристики заполнителя, для которой используется модуль крупности при одновременном учете суммарной поверхности заполнителей. На основании анализа отмеченных работ можно прийти к выводу, что достижение высокой прочности легких бетонов возможно, если учитывается оптимальный зерновой состав крупного и

мелкого заполнителей и их соотношения в зависимости от содержания вяжущего и воды, и степени и способа уплотнения смеси.

Большинство специалистов указывает на большую роль предельной крупности пористых заполнителей в обеспечении заданной марки конструктивных легких бетонов.

Данные экспериментов показывают, что с уменьшением крупности заполнителя прочность легкого бетона растет. Эта тенденция особенно четко проявляется у аглопоритобетона.

Анализируя данные своих исследований, И.Н. Тимофеев [51] приходит к выводу, «...что повышение прочности бетона с уменьшением крупности керамзита определяется, в основном, двумя факторами: во-первых, различной величиной и характером пористости у различных фракций керамзита – чем мельче фракция, тем меньше пористость, больше количество мелкопористых гранул, отсюда и больше объемная масса в куске; во-вторых, размером гранул – чем меньше гранулы, тем меньше амплитуды колебаний эпюры напряжений в сечении конгломерата...».

Повышение прочности бетона с уменьшением крупности аглопоритового заполнителя обуславливается не только увеличением  $\gamma$  в куске, но и увеличением удельной открытой поверхностной пористости. Следовательно, адгезионное сцепление, которое играет большое значение в формировании прочности бетона, будет значительнее сказываться на более мелких фракциях. Требования к предельной крупности пористых заполнителей для легких конструктивных бетонов отражены в соответствующих стандартах и технических условиях.

Полезно сопоставить имеющиеся данные о предельной крупности заполнителя для тяжелых и легких бетонов. В принципе, они совпадают, особенно если рассматриваются с учетом расхода цемента (прочности цементного раствора).

Особенно наглядно это показано в работе Г.Д. Цискрели и А.Н. Джавахидзе [59]. Ими установлено, что укрупнения зернового состава заполнителя снижает относительную прочность на растяжение, поэтому для получения повышенной прочности и деформативности на растяжение требуется развитая поверхность заполнителя и даже некоторое повышение содержания цементного камня для увеличения деформативности.

Рассматриваемая нами связь между крупностью заполнителя и прочностью легких бетонов значительно универсальнее, чем это представляется по сделанному краткому литературному обзору. С



уменьшением крупности не только возрастает поверхность, уменьшается суммарная пористость заполнителя и, в результате, создаются условия для повышения прочности бетона, но и протекает ряд других важных явлений.

Так, наблюдается уменьшение начальных напряжений в гранулах керамзита при охлаждении, отделение части материала, ослабленного микротрещинами при дроблении аглопорита, уменьшение деформаций набухания заполнителя при контакте с водой, повышение стойкости при циклическом воздействии окружающей среды, существенно увеличивается обжатие заполнителя.

### 1.2.3. Влияние формы, характера и состояния поверхности пористых заполнителей

Форма зерен заполнителя может существенно влиять на прочность отдельного зерна и плотность упаковки их в единице объема бетона.

В НИИКерамзита [60] проведено исследование по определению влияния на прочность керамзитобетона формы и поверхности гранул керамзита. Установлено, что коэффициент формы ( $K_{\phi}$ ), представляющий собой отношение суммы наибольших размеров гранул к сумме их меньших размеров, керамзитового гравия оказывает существенное влияние на прочность бетона.

Исследованиями показано, что увеличение коэффициента формы гравия с 1 до 1,5 не влияет на качество бетона; при коэффициенте формы 2 прочность его уменьшается на 27 %, а при 2,5 – на 34 %. По мнению тех же авторов, характер поверхности керамзитового заполнителя не оказывает большого влияния на основные физико-механические свойства керамзитобетона средних марок. Для конструктивных бетонов (марок 200 и выше) влияние поверхности велико, и целесообразно применять дробленный керамзитовый щебень.

Элинзон М.П. и др. [53, 54] считают, что форма заполнителей должна быть округлой, керамзитовые гранулы цилиндрической формы ухудшают качество бетона. Поверхность гранул предпочтительнее шероховатая.

Помимо физических явлений, обусловленных рассматриваемыми свойствами пористых заполнителей, немаловажное значение имеют процессы химического взаимодействия заполнителя с цементным камнем. В области тяжелых бетонов повышенный интерес к физико-химической характеристике поверхности заполнителей возник в связи

с применением карбонатных бетонов, а также с постоянным повышением требований к прочности.

Под руководством П.И. Баженова был проведен ряд исследований, в которых использовались заполнители различного минералогического состава и разной степени кислотности и щелочности. Полученные результаты показали, что даже малоактивные, в общем понимании «инертные» каменные заполнители, проявляют свою химическую природу. По мнению авторов: «чем ближе по своему химическому составу и структуре заполнитель и цемент, тем больше контакт между ними и лучше срастание продуктов новообразований с заполнителем».

Еще более существенно должны сказываться характеристика и состояние поверхности, если бетон изготовлен на пористых заполнителях. В этом случае проявляется гидравлическая активность керамзита и аглопорита, установленная исследованиями ряда авторов.

Маилян Р.Л. [40] показывает, что при недостаточной степени срастания цементного камня с заполнителем разрушение бетонов происходит по контакту цементного раствора и заполнителей, что приводит к неполному использованию прочности как заполнителей, так и цементного раствора.

Иванов И.А. и др. [15] полагают, что по мере повышения степени срастания цементного камня с пористым заполнителем значительно ослабляются пограничные образования микротрещин и очагов концентрации напряжений, следствием чего является повышение прочности бетона.

Адгезия цементного клея к заполнителям оказывает очень существенное влияние на физико-химические свойства бетона. По теории Б.В. Дерягина и Н.А. Кротовой [61], адгезионное сцепление обусловлено наличием аттракционных сил, действующих между молекулами, атомами, ионами.

Дебройн Н. [62] и ряд других зарубежных исследователей развивают адсорбционную теорию (теорию межмолекулярных сил). Эта теория объясняет адгезию и когезию преимущественно проявлением Ван-дер-Ваальсовых сил между молекулами взаимодействующих твердых тел.

Адгезия цементного клея к заполнителям зависит от некоторых особенностей последнего.

Так, в опытах И.И. Егорова и Э.Р. Пинуса было показано влияние минералогического состава заполнителя на адгезионное взаимодействие. Лучшие показатели по сцеплению были получены с известняком.

По мнению А.М. Викторова [63], химико-минералогический состав заполнителя не оказывает особого влияния на адгезию, главным

фактором, обуславливающим прочность сцепления, он считает водопоглощение заполнителя.

К такому же выводу пришли А.К. Шрейберг, Г.И. Горчаков и Л.И. Абрамов [64]. В их опытах с увеличением пористости заполнителя адгезия цементного камня возрастала, с известняком она оказалась выше в 1,5-1,7 раза, чем с гранитом, В.Ф. Журавлев и Н.П. Шейерт [65] объясняют природу сцепления, исходя из физико-химических и химических процессов в зоне контакта.

Фарран, напротив, отмечает несущественную роль химического взаимодействия между цементным камнем и заполнителем.

Следует отметить, что пористые заполнители, как естественные, так и искусственные, обладающие более развитой поверхностью по сравнению с плотными, имеют несомненное преимущество для проявления максимальной величины адгезии, т.к. последняя зависит от числа контактов с поверхностью заполнителя.

#### 1.2.4. Влияние водопоглощения пористых заполнителей

На неопределенный характер В/Ц отношения в формулах прочности легкого бетона было обращено внимание Н.А. Поповым еще в 1933г. Неопределенность В/Ц заключается в различной степени водопоглощения пористых заполнителей в легкобетонных смесях.

Для иллюстрации влияния количества воды затворения в легкобетонной смеси на формирование структуры и прочности бетона воспользуемся графиком, приведенным в работе А.И. Тимофеева [51], рис. 2.

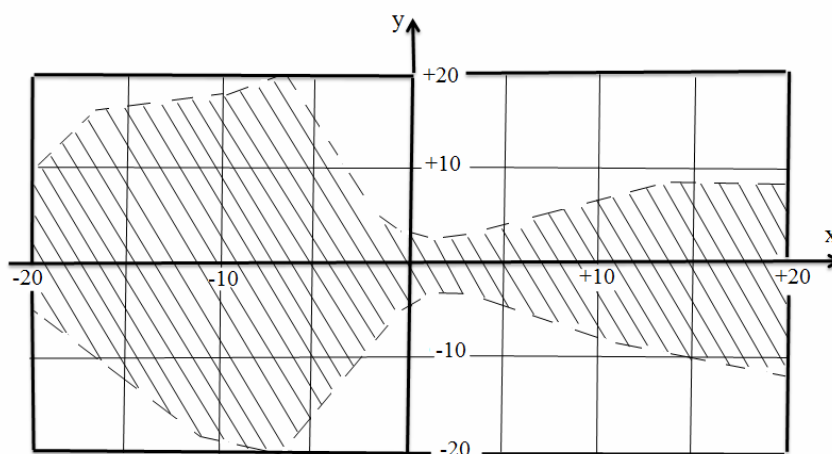


Рис. 2. Разброс прочности легких бетонов в зависимости от избытка и недостатка воды:  
по оси X – отклонения в расходе воды от оптимальной водопотребности легкобетонной смеси в %; по оси Y – отклонения прочности отдельных образцов легкого бетона от среднего значения серии образцов в %

Из графика видно, что недостаток воды в смеси в количестве 5-8 % от оптимального дает отклонения в показателях прочности от среднего значения  $\pm 15-20$  %.

Избыток воды, соответственно, снижает прочность бетона, но разброс показателей прочности в 3-4 раза меньше. Таким образом, при недостатке воды структура бетона получается более неоднородная, имеют место недоуплотненные участки, раковины.

Интенсивность водопоглощения (водоотсасывающая способность) пористого заполнителя зависит от его исходной влажности, пористости и характера пор, температуры воздуха и составляющих, атмосферного давления и других факторов. Все эти характеристики часто меняются во времени, что будет отражаться на показателе однородности изделий из легкого бетона. Чтобы выяснить истинное В/Ц и фактическую водопотребность, необходимо учитывать водопоглощение пористых заполнителей.

Явление самовакуумирования бетонной смеси пористых заполнителей исследовано проф. М.З. Симоновым [5]. Им показано, что этот процесс улучшает условия твердения цементного камня и увеличивает его прочность. Необходимо отметить, что М.З.Симонов проводил свои исследования на пемзо- и туфобетонах.

Искусственные пористые заполнители, обладающие сравнительно крупными и замкнутыми порами, будут сравнительно меньше проявлять явление самовакуумирования бетонной смеси по сравнению с природными пористыми заполнителями с ярко выраженной капиллярно-пористой структурой, что было отражено в исследованиях Н.А. Попова.

Кинетика же водопоглощения заполнителей оказывает существенное влияние на структурообразование и прочность легкого бетона.

Так, А.А. Аракелян [56] показал, что литоидная пемза, обладающая замедленной скоростью водопоглощения, по сравнению с туфовыми заполнителями, будет более продолжительное время отсасывать воду из цементного теста, что способствует лучшему формированию контактного слоя между цементным камнем и заполнителем. В его опытах прочность бетона на литоидной пемзе была больше, чем на туфовом заполнителе.

Улучшению контактного слоя в процессе самовакуумирования способствует также отсутствие седиментационных явлений в бетонной смеси, которые проявляются в бетонах на плотных заполнителях [23].

В настоящее время еще не сложилось единое мнение о том, в каком состоянии, а именно, в сухом или влажном, следует вводить пористый

заполнитель в бетонную смесь. Например, М.М. Израелит и С.М. Каган считают, что предварительное насыщение пористых заполнителей водой (т.е. при исключении отсоса воды заполнителями) обеспечивает нарастание прочности даже больше, чем при самовакуумировании.

Американские ученые полагают, что пористые заполнители перед смешиванием нужно увлажнять, но не до полного насыщения и выдерживать заполнитель после увлажнения не менее 12 часов для равномерного распределения влаги [66].

Следует думать, что вопрос о начальном водонасыщении может быть правильно решен, если будут учитываться два обстоятельства:

1) заданная удобоукладываемость бетонной смеси, зависящая от начального водонасыщения;

2) величина и характер деформаций пористого заполнителя при контакте с водой.

#### 1.2.5. Влияние степени насыщения бетона пористым заполнителем

Ваганов А.И. [2, 3], изучая свойства керамзитобетона в зависимости от соотношения мелких и крупных фракций заполнителя, принял в качестве одной из характеристик, определяющих прочность и объемный вес бетона, относительное содержание пористого заполнителя в бетоне, выражаемое величиной

$$r = \frac{K}{\gamma_3}, \quad (4)$$

где  $K$  – содержание крупного заполнителя в кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона;

$\gamma_3$  – средний объемный вес зерен заполнителя в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Анализируя посредством этого показателя свои данные, автор приходит к выводу о значительном влиянии на прочность керамзитобетона степени насыщения бетона заполнителем и его зернового состава.

В опытах Ваганова А.И. с уменьшением  $r$  предел прочности керамзитобетона увеличивается.

Для тяжелых бетонов эта зависимость имеет противоположный характер, т.е. с меньшим содержанием цемента, при тех же значениях В/Ц, прочность бетона возрастает [46, 47].

Уменьшение предела прочности керамзитобетона с увеличением  $r$  А.В. Ваганов объясняет меньшим модулем деформации керамзитового гравия по сравнению с модулем упругости раствора.

Рассмотрим имеющиеся математические формулы, показывающие связь прочности со свойствами компонентов легких бетонов.

Т а б л и ц а 1

№ п п	Автор формулы	Предлагаемая математическая зависимость (формула)	Какие характеристики заполнителя цементного камня входят в явной форме		
			фи- зи- чес- кие	проч- ност- ные	де- фор- мати- вные
1	2	3	4	5	6
1	Ваганов А.И.	$R = E_B \cdot \frac{\varepsilon_1}{\eta} = E_B \cdot \varepsilon$	-	-	да
2	Скрамтаев Б.Г.	$P_1 = \frac{PF_P}{F} \left(1 - \frac{E_3 F_3}{E_P F_P}\right)$	-	да	да
3	Фрайфельд С.Е.	$R = R_3 \left[1 - \frac{\sigma_y (\lambda_3 - 2)}{R_3}\right]$ $\left[1 + \frac{1}{E_3} (E_C - E_3) (1 - \mu_3)\right] \frac{1}{K}$	-	да	да
4	Ахвердов И.Н.	$R_B = \frac{\alpha \cdot R_{Ц}}{1 + 1,65 \frac{K_{Н.Г}}{K_{Н.Г}} * \frac{B^{ост.}}{Ц_{стр.}} - 1,65 \frac{K_{Н.Г}}{K_{Н.Г}}}$	да	да	-
5	Симонов М.З.	$R_6 = \frac{R_{Ц}}{0,45} \rho^2 \mu_{Ц} + R_3 (1 - \mu_{Ц})$	да	да	-
6	Худовердян В.М.	$R_B = \frac{R_3}{3} \left[ \sqrt{1 + 6,6 \frac{R_{Ц}}{R_3} \left(\frac{Ц}{B} - 0,5\right)} - 1 \right]$	да	да	-
7	Корнилович Ю.Е. Надиевский Ю.Д.	$R_B = \frac{R_K}{\alpha_K} S_K + 10 \cdot R_3^{цим.} (1 - S_K)$	-	да	-
8	Маилян Р.Л.	$R_B = R_{Ц} [Ц(3,69\Pi - 0,2) \cdot 10^{-3} - 0,6\Pi - 0,18]$	-	да	-

При этом мы не ставим себе целью их критически анализировать и сопоставлять. Наша задача имеет более ограниченный характер. Представляется полезным выяснить, в какой степени деформативные свойства заполнителей привлекали внимание авторов ниже рассматриваемых закономерностей. Б.Г. Скрамтаев [33] предлагал для бетонов на малопрочных заполнителях следующую формулу:

$$P_1 = \frac{PF_p}{F} \left(1 - \frac{E_3 F_3}{E_p F_p}\right), \quad (5)$$

где  $P_1$  – прочность бетона;

$P$  – прочность образца из раствора;

$F$  – площадь сечения образца бетона;

$F_p$  – площадь сечения цементного раствора;

$F_3$  – площадь сечения заполнителя;

$E_p$  – модуль упругости раствора;

$E_3$  – модуль упругости заполнителя.

Фрайфельд С.Е. [67] рекомендовал зависимость прочности бетона с учетом упругих характеристик его компонентов

$$R = R_3 \left[1 - \frac{\sigma_y (\lambda_3 - 2)}{R_3}\right] \left[1 + \frac{1}{E_3} (E_c - E_3) (1 - \mu_3)\right] \frac{1}{K}, \quad (6)$$

где  $E_3$  и  $E_c$  – модули линейной деформации крупного заполнителя и скелета;

$\sigma_y$  – внутреннее напряжение от усадки;

$K$  – коэффициент степени концентрации напряжения;

$\lambda_3$  – значение объемной деформации крупного заполнителя;

$\mu_3$  – относительное объемное содержание крупного заполнителя в бетоне;

$R_3$  – прочность заполнителя.

По формуле Фрайфельда С.Е., прочность легкого бетона зависит от модуля деформации скелета.

В формуле Ваганова А.И. [3] прочность бетона обусловлена модулем деформации бетона в момент разрушения –  $E_B$ , коэффициентом Пуассона –  $\eta$ , предельной сжимаемостью –  $\varepsilon$  и предельной растяжимостью бетона –  $\varepsilon_1$

$$R = E_B \cdot \frac{\varepsilon_1}{\eta} = E_B \cdot \varepsilon \quad (7)$$

В формулах И.Н. Ахвердова

$$R_{\text{Б}} = \frac{\alpha \cdot R_{\text{Ц}}}{\frac{1 + 1.65 K_{\text{н.г}}}{K_{\text{н.г}}} \cdot \frac{B^{\text{ост.}}}{\text{Ц}_{\text{стр.}}} - 1.65 K_{\text{н.г}}} \quad (8)$$

где  $\alpha$  – опытный коэффициент, учитывающий степень использования прочности цементного камня на сжатие в легких бетонах.

В формуле М.З. Симонова [5]

$$R_{\text{б}} = \frac{R_{\text{ц}}}{0.45} \rho^2 \mu_{\text{ц}} + R_{\text{з}}(1 - \mu_{\text{ц}}), \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность цементного камня в бетоне;

$\mu$  – показатель отношения площади разрыва по цементному камню ко всей площади разрыва, прочность легкого бетона рассматривается через прочностные характеристики цементного камня и пористого заполнителя.

В формуле В.М. Худовердяна [50] прочность бетона представлена в зависимости от активности цемента  $R_{\text{ц}}$ , В/Ц отношения и прочности заполнителей

$$R_{\text{Б}} = \frac{R_{\text{з}}}{3} \left[ \sqrt{1 + 6.6 \frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{з}}} \left( \frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0.5 \right)} - 1 \right]. \quad (10)$$

Корнилович Ю.Е. и Нагиевский Ю.Д. [22] для определения прочности бетона на пористых заполнителях предложили следующие формулы

$$R_{\text{Б}} = \frac{R_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}}} S_{\text{к}} + 10 \cdot R_{\text{з}}^{\text{цим.}} (1 - S_{\text{к}}), \quad (11)$$

где  $R_{\text{к}}$  – кубиковая прочность цементного камня;

$\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений в бетоне;

$S_{\text{к}}$  – расчетная относительная площадь цементного камня в сечении бетона;

10 – опытный коэффициент, учитывающий соотношение предела прочности при сжатии кубиков заполнителя размером 5х5х5 см к прочности щебня из того же материала, определенного по ГОСТ в стальном цилиндре.



Маилян Р.Л. [40] предложена зависимость для определения прочности бетона на различных пористых заполнителях (при жесткости бетонной смеси 30-40 с):

$$R_B = R_{Ц}[\Psi(3,69\Pi-0,2) \cdot 10^{-3} - 0,6\Pi - 0,18], \quad (12)$$

где  $R_{Ц}$  – активность цемента, кг/см<sup>2</sup>;

$\Psi$  – расход цемента, кг/см<sup>2</sup>;

$\Pi$  – показатель прочности (качества) заполнителя, определяемый по дополнительной формуле.

Для сопоставления этих формул сведем их в табл.1.

Довольно обстоятельный анализ вышеуказанных формул дан в работе Р.Л. Маиляна [40].

В итоге рассмотрения табл. 1 приходим к выводу, что деформативные свойства заполнителей учитываются в явной форме лишь Б.Г. Скрамтаевым и С.Е. Фрайфельдом. Примечательно, что последний вводит представление о внутренних напряжениях, называемых усадкой, и концентрации напряжений.

Большинство специалистов в области легких бетонов, видимо, придают большее значение фактору пористости бетона в целом или его отдельных компонентов, не задаваясь целью использовать характеристики деформативности. Нам представляется, что одна из причин этих позиций заключается в объективно непознанном еще в полной мере факте изменчивости деформативных свойств пористых заполнителей. Изменчивости, вызываемой рядом факторов, трудно поддающихся контролю. Именно их действие и нарушает «стройность» рассуждений при создании математических формул. Исходя из этого, полезность установления и изучения факторов, влияющих на изменчивость деформативных свойств заполнителей, становится вполне очевидной.

### 1.3. Технологические особенности формирования структуры легких бетонов

Особенностью современных исследований в области технологии бетонов вообще и легких, в частности, является то, что в них все с большей определенностью проявляется не только изучение прочности и долговечности, но также и деформативных особенностей этих материалов.

Существенной особенностью легких бетонов является повышенная деформативность пористых заполнителей, а через них – и легких бетонов. Эта особенность оценивается как своеобразный недостаток легких бетонов. Поэтому своевременным и необходимым является изучение деформативных особенностей пористых заполнителей, когда они рассматриваются в сочетании с цементным камнем.

Анализ литературных источников по этому вопросу показал очень ограниченное количество работ, посвященных изучению этих свойств заполнителей. В анализе исследований, выполненных за последние годы, в области конструкционных легких бетонов мы постарались учесть те результаты, которые относятся к формированию структуры и свойств легких бетонов.

Нам представляется очень правильной постановка в принципе вопроса о том, что неоднородность бетона должна быть дополнена целым рядом факторов, характеризующих неоднородность с точки зрения специфических особенностей искусственных пористых заполнителей, а именно:

1) искусственные пористые заполнители в процессе их пиропластического производства неизбежно получают существенные внутренние напряжения, которые возникают при охлаждении;

2) представления о пористой структуре заполнителей должны быть дополнены с учетом неизбежностей их субмикроскопических разрывов в межпоровых перегородках;

3) контакт с водой должен вызывать не только процесс значительного количества аккумуляции влаги, но и сопутствующие этому деформации расширения и сжатия.

Поскольку в легком бетоне имеются две пористые структуры (цементный камень и заполнитель), в которых баланс влаги непрерывно меняется, необходимо учитывать деформации заполнителей не только при поглощении воды заполнителем из цементного теста и при отдаче ее цементному камню, но также и при циклическом воздействии, когда влага может поглощаться заполнителем и отдаваться в цементный камень.

Следует учитывать также деформации заполнителя, возникающие при обжатии его твердеющей окружающей цементной матрицей.

Исследование этих деформативных особенностей искусственных пористых заполнителей мы проводили на плоской и объемной моделях, а также непосредственно в бетоне. Это дало возможность подойти к изучению вопроса о взаимном влиянии этих компонентов бетона, приводящих к взаимно обусловленному изменению их свойств.

Для большей объективности получаемых результатов и логического развития разработанных методик исследования была принята следующая последовательность изучения деформативных свойств заполнителей и окружающей цементной обоймы (матрицы).

1 этап. Изучение деформативных особенностей непосредственно на зерне заполнителя.

2 этап. Изучение деформаций на плоской модели.

3 этап. Изучение деформаций на объемной модели.

4 этап. Изучение деформаций заполнителя непосредственно в бетоне.

Поставленные задачи исследования вызвали необходимость в разработке некоторых новых методик. В частности, для определения напряженного состояния гранул керамзита.

Отличительной особенностью внутренних напряжений является то, что они существуют и уравниваются в зерне заполнителя без приложения внешней нагрузки. Скорость релаксации напряжений в твердых телах, как известно, мала. Более интенсивное перераспределение этой избыточной потенциальной энергии может наблюдаться лишь при нарушении равновесия между напряжениями и деформациями. Именно на этом принципе основывается предложенный метод.

Для этого с диаметрально противоположных сторон гранулы ставили репера. Затем на участке между реперами выполняли кольцевые надрезы на глубину обжиговой оболочки, которые вызывают нарушения равновесия между напряжениями и деформациями в грануле керамзита.

Особенностью указанной методики является чрезвычайно малый размер измеряемых деформаций в пределах 3...8 мкм. Деформации такого порядка могут классифицироваться для керамических материалов как упругопластические. Полученные численные значения деформаций показывают, что ядро керамзитовой гранулы находится в растянутом состоянии с напряжением 0,6...0,9 МПа, а оболочка гранулы – в сжатом состоянии с напряжением 3...3,5 МПа.

В отдельных случаях, которые характеризуются ярко выраженным неравномерным распределением пор неправильной формы с крупными включениями типа каверн размером до 0,6 мм, знак напряжений меняется на обратный. А именно, оболочка характеризуется напряжениями растяжения, а ядро – напряжениями сжатия.

При контакте искусственных пористых заполнителей с водой имеет место нарастание деформаций расширения, а при высушивании –

деформаций сжатия. Однако, характерной особенностью при этом является то, что после первого цикла насыщения и высушивания значительная часть деформаций остается необратимой, то есть для них характерна остаточная деформация расширения. Это относится как к керамзитовому, так и к аглопоритовому зерну, но в большей степени – к керамзиту.

Параллельно определяли прочностные характеристики керамзита и изменение структуры гранул ультразвуковым методом. Опыты показали, что деформативные особенности керамзита коррелируются со скоростью распространения ультразвука, а прочность его не падает ни во влажном, ни в высушенном после насыщения состояниях. Если же воздействие окружающей среды будет циклическим, то есть насыщение водой будет чередоваться с отдачей влаги при высушивании, то характер деформации части заполнителей проявляет аномальность, при этом следует обратить внимание на то, что высушивание проходило в сушильном шкафу при 105 °С.

Обнаруженная аномалия заключается в том, что искусственные пористые заполнители получают деформации расширения не только при насыщении водой, но и при высушивании. Объяснение этой аномалии следует искать в начальном напряженном состоянии структуры заполнителей.

Дальнейшие исследования исходили из трех указанных выше особенностей заполнителей и проводились на модели, состоящей из зерна и цементной обоймы. Положительной особенностью модели является отсутствие множественности действующих факторов и выделение при исследовании лишь факторов, характеризующих взаимное влияние между компонентами в результате гидратации цемента и миграции влаги.

Однако модели имеют и недостаток, а именно, не представляется возможным учета на них пространственного расположения зерен в бетоне и переменной толщины оболочек, окружающих зерна заполнителей при разном коэффициенте его насыщения в бетоне. На этих моделях был установлен сложный характер совместных деформаций заполнителя и обоймы (матрицы) в процессе твердения последней.

Предполагаемый характер деформаций пористых заполнителей был сформулирован в рабочей гипотезе об эффекте предварительного обжатия пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в легком бетоне, которая нашла подтверждение на всех этапах исследования, а именно, на плоской и объемной моделях и в бетоне.

Интенсивность обжатия пористого заполнителя, его величина и стабильность этого явления зависит не только от самопроизвольных деформаций цементной оболочки, известной как усадка, но также и от деформаций расширения пористого заполнителя, особенно в первые сутки твердения, когда происходит интенсивный обмен влагой между компонентами бетона. Этот эффект расширения пористых заполнителей может быть даже более существенным, чем эффект обжатия за счет деформаций усадки цементного камня (цементно-песчаного раствора).

Эффект предварительного обжатия, который, как установлено, усиливается в результате встречного расширения заполнителя, является, безусловно, положительным явлением в процессе формирования структуры легкого бетона, так как способствует накоплению упругой деформации пористого заполнителя, что, в свою очередь, приводит к повышению его предельной растяжимости.

Проведенные исследования показали, что характер и величина показателей деформации зависят от:

- 1) пористости и деформативности цементного камня и заполнителя;
- 2) влажностного состояния заполнителя до введения в бетонную смесь;
- 3) условий твердения, а именно, влажности и температуры окружающей среды;
- 4) состава цементного раствора и составляющих его компонентов.

Положительные проявления этого эффекта заключаются в том, что упругая деформация расширения пористого заполнителя способствует лучшей адгезии, повышенная деформативность пористых заполнителей разгружает окружающий его цементный камень от возникающих в процессе твердения структурных напряжений, что повышает его трещиностойкость.

Если рассматривать эффект обжатия в чистом виде, то есть, если обжатие создает в зерне заполнителя напряжения обратного знака по сравнению с теми, которые будут в нем возникать при работе конструкции, то можно отметить следующее – в результате усадки, набухания реакционных каемок и проявления осмотического давления наблюдаются существенные деформации обжатия зерен заполнителей, которые повышают растяжимость пористых заполнителей, что, в свою очередь, должно положительно сказываться на прочности легких бетонов и конструкций на его основе.

Задачей технологии является создание наиболее благоприятного сочетания деформаций компонентов бетона при формировании его структуры. При этом приходится учитывать возможность одного из следующих трех вариантов влажностного состояния заполнителя: 1) когда он вводится в бетонную смесь в воздушно-сухом состоянии, 2) когда он специально насыщается водой; 3) когда он вводится в воздушно-сухом состоянии, но после определенных циклов попеременного увлажнения и высушивания при условии хранения в открытом складе.

Именно для этих характерных случаев были изготовлены образцы из керамзитобетона.

В результате обработки полученных данных можно высказать следующие рекомендации: 1) в общем случае, когда водосодержание бетонной смеси позволяет произвести нормальное уплотнение ее при укладке, заполнитель следует применять в воздушно-сухом состоянии; 2) в случае недостаточной удобоукладываемости рационально повышать ее за счет введение пластифицирующих добавок, а не проводить предварительное насыщение заполнителя для сохранения водоцементного отношения бетонной смеси; 3) влияние циклического воздействия увлажнения и высушивания при умеренном количестве, наблюдаемом в производстве, не может считаться отрицательным. Однако, неконтролируемое остаточное водосодержание и, главное, возможность его неравномерности в отдельных зернах должна ориентировать нас на хранение пористых заполнителей на заводах по производству бетона в закрытых складах.

Для получения легких конструкционных бетонов не только высокой прочности, но и возможно меньшей деформативности особое значение приобретает кинетика твердения вяжущего, которая с учетом деформативных особенностей заполнителя должна характеризоваться такой скоростью нарастания прочности, которая превышает скорость нарастания усадочных деформаций и напряжений. Это общеизвестное положение для легких бетонов имеет первостепенное значение потому, что показанная многовариантность совместных деформаций пористого заполнителя и цементного камня дает в руки технолога возможность выбрать из числа многих вариантов лучший для данного заполнителя и требуемых свойств легкого бетона.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

### 2.1. Искусственные пористые заполнители как материал значительных внутренних напряжений структуры

Умение создать необходимую микро- и макроструктуру материала, которая определяет весь комплекс его механических свойств, обуславливается пониманием и управлением разнообразных процессов их производства.

Существующие технологические схемы производства искусственных пористых заполнителей (керамзита, аглопорита) не могут полностью обеспечить совершенства их структуры.

Виноградов Б.Н. и др. [68] отмечают, что пористая структура аглопорита состоит из крупных сообщающихся между собой каверн и мелких изолированных пор. По их мнению, различная форма (геометрия) пор зависит от скорости охлаждения аглопорита.

Будников П.П. и др. [69], изучая внутреннюю структуру и фазовый состав керамзита методами микроскопии и рентгеновского анализа, установили, "... что керамзит, полученный в условиях, близких к принятой в настоящее время технологии, характеризуется не только неоднородной пористостью, но и различным фазовым составом, изменяющимся от центра гранул к их поверхности".

Внутренние силы, которые обеспечивают вспучивание исходного сырья в пиропластическом состоянии, в современной технологии являются неуправляемыми. Они обусловлены неравномерным распределением топлива в исходном сырье, неоднородностью химического, минералогического и гранулометрического состава глинистого сырья, различной газопроницаемостью и другими факторами, что в конечном итоге характеризует неоднородность структуры пористого заполнителя.

Фазовый состав аглопорита и керамзита, определенный с помощью физико-химических исследований, петрографического и рентгеновского анализа, показывает, что пористые заполнители, как правило, состоят в основном из стекловидной фазы, имеющей включения из непрореагировавших частиц кварца и других не подвергшихся расплавлению минералов и небольшого количества кристаллических новообразований стекла [68-70].

В процессе производства искусственные пористые заполнители получают существенные внутренние напряжения, возникающие под

влиянием градиента температур при охлаждении, неоднородности структуры и фазовых превращений. В гранулах пористых заполнителей в процессе охлаждения устанавливается нестационарное температурное поле. Объемные деформации, возникающие при этом, неравномерны.

Все эти вместе взятые явления приводят к возникновению остаточных напряжений в пористом заполнителе.

В работе [68] показано влияние скорости охлаждения на структуру и прочность аглопорита. Петрографическим и рентгеноструктурным методами авторы определили равную степень закристаллизованности аглопорита в зависимости от режима охлаждения. Прочность быстро охлажденных водой образцов аглопорита значительно уменьшалась по сравнению с образцами, скорость остывания которых составляла 20-100 град/мин.

Заметное снижение прочности быстро охлажденных образцов авторы объясняют "...появлением тонких трещинок в остеклованных перегородках между порами".

Бесспорно, возникновение трещинок в перегородках является следствием значительных температурных напряжений.

Таким образом, у керамзита и аглопорита, помимо наличия химической энергии, выражающейся в их гидравлической активности, имеется еще избыточная механическая энергия от остаточных структурных и температурных напряжений. Естественно, что от неравномерности распределения внутренних напряжений по объему зерен заполнителя возникает термодинамическая неустойчивость, сопровождающаяся релаксацией напряжений по всему объему.

Скорость релаксации напряжений в твердых телах очень мала, поэтому устойчивого равновесного состояния они достигают через продолжительное время, измеряемое годами.

Более интенсивное перераспределение этой избыточной потенциальной механической энергии может наблюдаться лишь при нарушении равновесия между напряжениями и деформациями за счет релаксации или возникновения добавочных упругих деформации.

В практической деятельности для снятия остаточных напряжений обычно применяют отжиг. В последнее время для этих целей стали применять ультразвуковые колебания [71]. Как первый, так и второй методы способствуют увеличению кинетической энергии атомов, что ускоряет процесс релаксации избыточной энергии. Каждый из атомов стремится занять наиболее устойчивое состояние, обуславливая существование более совершенной структуры.



Остаточные напряжения пористых заполнителей, полученные ими в процессе производства, оказывают значительное влияние на некоторые свойства материала в бетоне и на конгломерат в целом. В первую очередь, представляют значительный интерес деформации заполнителей (а они отображают внутренние напряжения) при миграции влаги.

Специфическое проявление остаточных напряжений пористыми заполнителями (керамзитом и аглопоритом) при их контактировании с водой будет рассмотрено ниже.

## 2.2. Оценка остаточных (внутренних) напряжений гранулах пористого заполнителя – керамзита

Как отмечалось выше, в процессе получения керамзита и аглопорита в них одновременно происходит накопление упругой энергии остаточных напряжений, различных по характеру возникновения и распределения по объему гранул. Отличительной особенностью остаточных напряжений является то, что они существуют и уравниваются в гранулах заполнителя без приложения внешней нагрузки.

Роль остаточных напряжений хорошо известна из практики применения различных материалов в технике. Современный подход к оценке однородности и долговечности пористых заполнителей не может быть объективным, если мы не будем располагать возможностью оценки указанных напряжений.

Исходя из этого, нами разработан способ определения остаточных напряжений в гранулах керамзита, который позволяет оценить качественно и количественно начальное напряженное состояние зерна заполнителя. Это открывает возможность объективно управлять процессом структурообразования легкого бетона, а также позволит отработать наиболее рациональный режим, с точки зрения напряженного состояния, охлаждения керамзита в процессе его производства.

Методика заключается в следующем.

На диаметрально противоположных сторонах исследуемой гранулы, на расстоянии порядка 4-5 мм от края просверливаются по одному отверстию диаметром 0,8-1,0 мм для постановки в них металлических реперов (рис. 3). Репера заделываются в отверстия на эпоксидном компаунде следующего состава: смолы ЭД-5 100 вес. ч., полиэтиленполиамина 15 % от веса смолы, цемент 50 вес. ч. Выступ реперов из гранулы рекомендуется делать не более 5 мм (рис.3). После отверждения эпоксидного компаунда (через 48 часов при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на

горизонтальном компараторе ИЗА-2 (рис.4) замеряется расстояние между реперами с точностью до 0,1 микрона. Затем, соблюдая осторожность, на участке между реперами выполняются 3 кольцевых надреза глубиной от 0,5 до 2,0 мм алмазной фрезой толщиной 1 мм (рис.3).

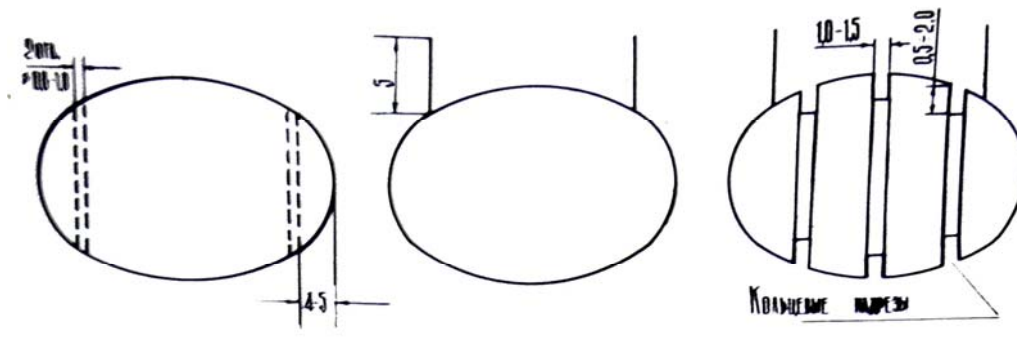


Рис. 3. Гранула керамзита с поставленными на ней реперами и выполненными кольцевыми надрезами

Выполненные кольцевые надрезы нарушают равновесие между напряжениями и деформациями в грануле керамзита. Деформация происходит мгновенно по мере нарушения целостности оболочки и ядра гранулы кольцевым надрезом.

Замеряя, после проделанных операций, расстояние между реперами, возможно фиксировать упругие деформации. В табл.2 приведены полученные в наших опытах деформации гранул керамзита после нарушения их целостности кольцевыми надрезами.

Объемный вес в куске гранул керамзита определялся методом вытеснений сыпучего материала (песка).

В остывающих гранулах керамзита возникает сложное напряженное состояние. Нарушая внешнюю оболочку, мы не можем качественно это напряженное состояние упростить. Однако проделанная операция позволяет фиксировать протекающие деформации, полагая их упругими. Естественно, что наше утверждение об упругом характере деформаций может вызывать сомнения.

Предугадывая это, хотим обратить внимание на чрезвычайно высокую точность осуществляемых замеров. Как указано выше, ИЗА-2 позволяет брать отсчеты с точностью до 0,1 микрона. Именно это обстоятельство является обязательным условием предлагаемой методики. При базе между реперами 15 мм, получаемые нами отсчеты составляют величину 2-10 микрона, что дает относительную деформацию от 0,02 % до 0,06 % или от 0,1 до 0,5 мм/м. Показанный порядок

деформаций соответствует хрупко-упругой природе керамических материалов и подтверждает реальность их существования в гранулах керамзита.

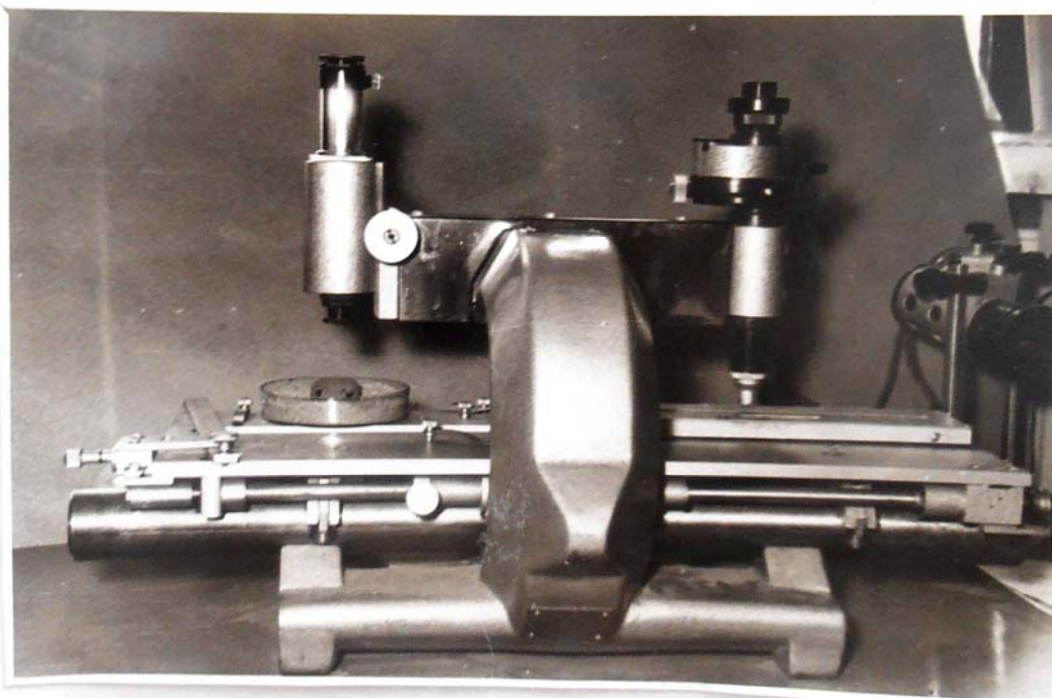


Рис. 4. Оптический компаратор ИЗА-2

Т а б л и ц а 2

Объемный вес в куске и деформации сжатия гранул керамзита

Характеристик и зерна керамзита	Номер образца										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Объемный вес в куске, г/см <sup>3</sup>	0,700	0,750	0,803	0,824	0,880	0,890	0,900	0,920	0,933	0,999	1,050
Деформация сжатия, мм/м	0,56	0,32	0,32	0,29	0,31	0,34	0,37	0,37	0,36	0,34	0,26

Естественно, что суммарная деформация, возникающая в зерне при охлаждении, существенно большая, поскольку доля остаточных деформаций может значительно превышать упругие.

Поэтому предлагаемый метод не претендует на высокую абсолютную точность, его роль ограничивается относительной оценкой гранул, охлажденных в различных условиях.

Количественное проявление упругих деформаций находится в зависимости от количества и глубины кольцевых надрезов, наиболее полное проявление деформаций происходит при снятии спекшейся оболочки между реперами на наждачном круге. При снятии корочки зерна на наждаке не следует чрезмерно разогревать гранулу керамзита. Замер расстояния между реперами производится при температуре исследуемой гранулы  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

Модуль упругости керамзитового зерна и керамзитовой гранулы со снятой на наждачном круге оболочкой определяется методом электрической тензометрии.

Зная замеренную деформацию, полученный модуль упругости и принимая толщину оболочки, равную глубине кольцевого надреза, можно определить величину и знак остаточных напряжений в ядре и оболочке гранулы керамзита.

Остаточные напряжения, определенные по этой методике, имеют следующие величины и знак. Ядро керамзитовой гранулы находится в растянутом состоянии с напряжением  $6-9 \text{ кг/см}^2$ , а оболочка – в сжатом состоянии с напряжением  $30-35 \text{ кг/см}^2$ .

Для замера деформаций можно использовать также вертикальный оптиметр ИЗВ-2. В этом случае вместо реперов на диаметрально противоположных сторонах гранулы строго по оси эпоксидным компаундом приклеиваются металлические бобышки. Остальные операции аналогичны вышеизложенным.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что:

- 1) остаточные напряжения значительно уменьшаются с уменьшением размера гранул и существенно увеличиваются при отклонении формы гранулы от оптимальной (шара) и особенно от наличия на ней трещин, выступов и изломов, т.е. концентраторов напряжений. Эти данные экспериментально подтверждают мнение ряда специалистов о предельном размере зерен заполнителей для конструктивных легких бетонов, исходя из новых взглядов на этот материал, а именно, из начального напряженного состояния;

2) остаточные напряжения в грануле керамзита, согласно общепризнанной классификации, можно разделить на два вида: к первому виду относятся напряжения, уравновешенные в объеме всей гранулы; ко второму – уравновешенные в объеме зерен кристаллов и между фазовыми составляющими керамзита (т.е. в микрообъемах ядра гранулы).

### 2.3. Деформативность искусственных пористых заполнителей при контакте их с водной средой

Известно, что естественные плотные заполнители при увлажнении и высушивании незначительно подвержены изменению объема по сравнению с затвердевшим цементным камнем.

Иная картина деформаций наблюдается у искусственных пористых заполнителей.

Опубликованных работ о деформациях пористых заполнителей при увлажнении и высушивании нет. Нам известны лишь исследования Крумела [72], но в них автор, отмечая факт “усадки пористого заполнителя”, не раскрывает сущности самого явления.

Одной из основных особенностей пористых заполнителей является их способность поглощать значительное количество воды. Подавляющее большинство специалистов положительно оценивает эту особенность, полагая, что она способствует интенсивному твердению легких бетонов и лучшему качеству цементного камня.

Высказываются два взгляда по вопросу о предварительном увлажнении заполнителей. Одни – за насыщение пористых заполнителей водой перед приготовлением бетонной смеси, другие против этого. Как отмечалось выше, этот вопрос можно решить положительно только с учетом особенностей влажностных деформаций пористых заполнителей.

Исходя из этого, авторами была поставлена задача исследовать деформативные особенности искусственных пористых заполнителей при контакте их с водной средой и высушивании, когда они берутся не в сочетании с другими компонентами бетона.

В наших исследованиях использовался аглопорит Черепановского кирпичного завода Новосибирской области с объемной массой в куске  $0,73-1,39 \text{ г/см}^3$ , керамзит Ленинградского завода керамических изделий с объемной массой  $0,75-0,81 \text{ г/см}^3$  и Куйбышевский керамзит с объемной массой в грануле  $0,75-0,88 \text{ г/см}^3$ .

Методика исследований такова. Из аглопоритового щебня готовились призмочки  $20 \times 20 \times 30$  мм. По двум торцам граней каждой призмочки приклеивали эпоксидным компаундом металлические репера – иголки для замера деформаций. Состав эпоксидного компаунда: 100 вес.ч. смолы ЭД-5, 10-12 вес.ч. полиэтиленполиамина и 50 вес.ч. портландцемента. Модуль упругости компаунда находится в пределах модуля упругости пористых заполнителей, показанного в работе [73]. После отверждения эпоксидной смолы на оптическом длинномере ИЗА-2 замерялся первоначальный размер между реперами.

Дальнейшие исследования деформации фиксировались ежедневно на компараторе ИЗА-2 в зависимости от режима водонасыщения и высушивания.

Керамзитовые гранулы отбирались поштучно с коэффициентом формы 1:2 с помощью специального трафарета. Перпендикулярно большой оси гранулы на её краях просверливали по одному отверстию диаметром 1 мм. В эти отверстия на эпоксидном компаунде заделывали (закладывали репера) иголки, как показано на рис. 3. Последующая методика исследований аналогична вышеизложенной.

Таким образом, наши опыты имеют две особенности, которых не было в исследованиях других авторов [74, 75].

1. Кинетика водопоглощения или высушивания, наблюдаемая по изменению веса, дополнена замером абсолютных и относительных деформаций заполнителя.

2. Опыты с водопоглощением не прекращались по достижению постоянства веса или деформации, а продолжались дальше, но в обратном направлении, т.е. до равновесного влагосодержания с окружающей средой. Это дало возможность определить остаточные деформации. На рис. 5, 6, 7 показана зависимость кинетики деформаций аглопорита и керамзита при длительном насыщении в воде (50 суток для аглопорита и 20 суток для керамзита) и высушивания до постоянного веса на воздухе. Из рис. 5 видно, что весовое водопоглощение аглопорита за 50 суток водного хранения стабилизируется и составляет примерно 34-35 %. Деформации расширения также прекращают расти и имеют величину 0,5-0,7 мм/м. При высушивании на воздухе через четверо суток образцы достигли первоначального веса, но размеры их не вернулись в исходное положение, и остаточная деформация имеет величину от 0,2 до 0,5 мм/м.

После этого сухие образцы помещали в эксикатор для сохранения постоянного веса и через 40 суток вновь замерялась деформации расширения.

Из графиков рис. 5, 6, 7 видно, что в процессе хранения в образцах изменяется потенциальная энергия внутренних напряжений структуры, обусловленная изменением деформации. Это говорит о том, что пористые наполнители обладают упруго-пластичной структурой.

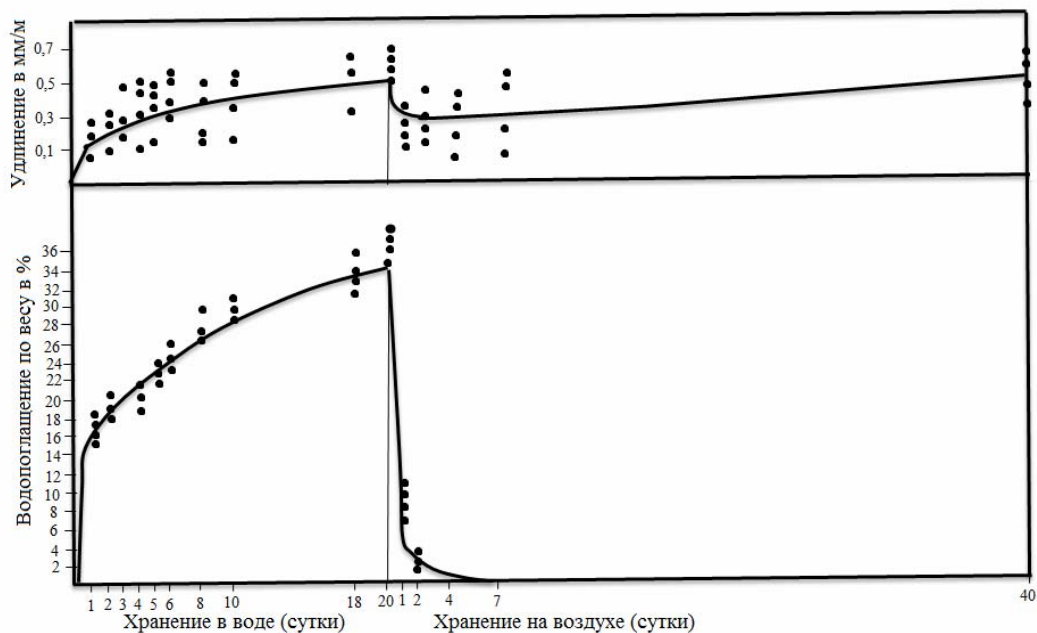


Рис. 5. Кинетика изменения водосодержания и линейных размеров черепановского аглопорита

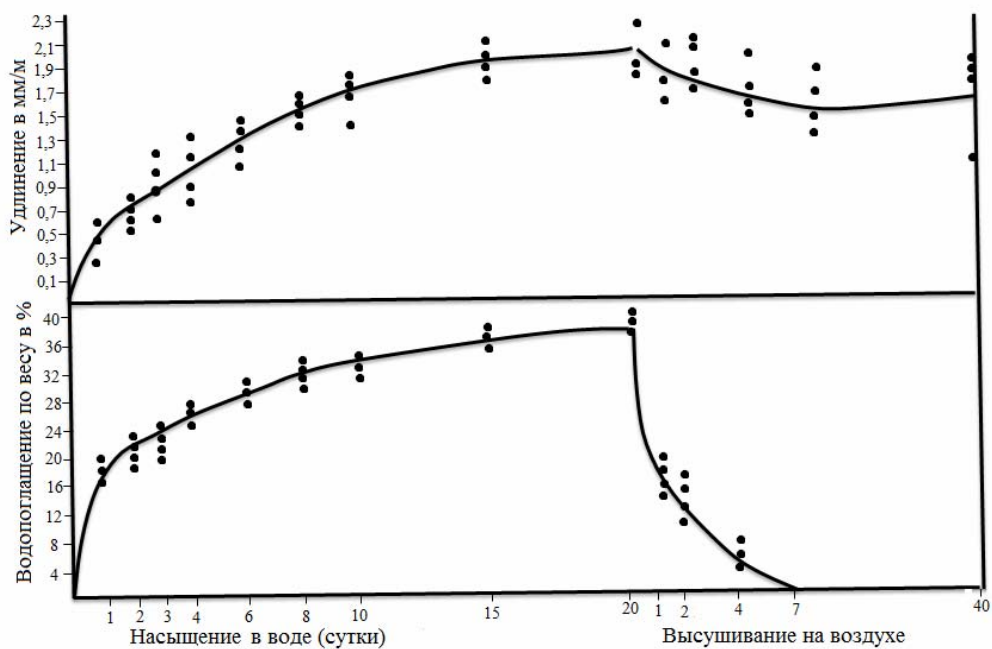


Рис. 6. Кинетика изменения водосодержания и линейных размеров куйбышевского керамзита

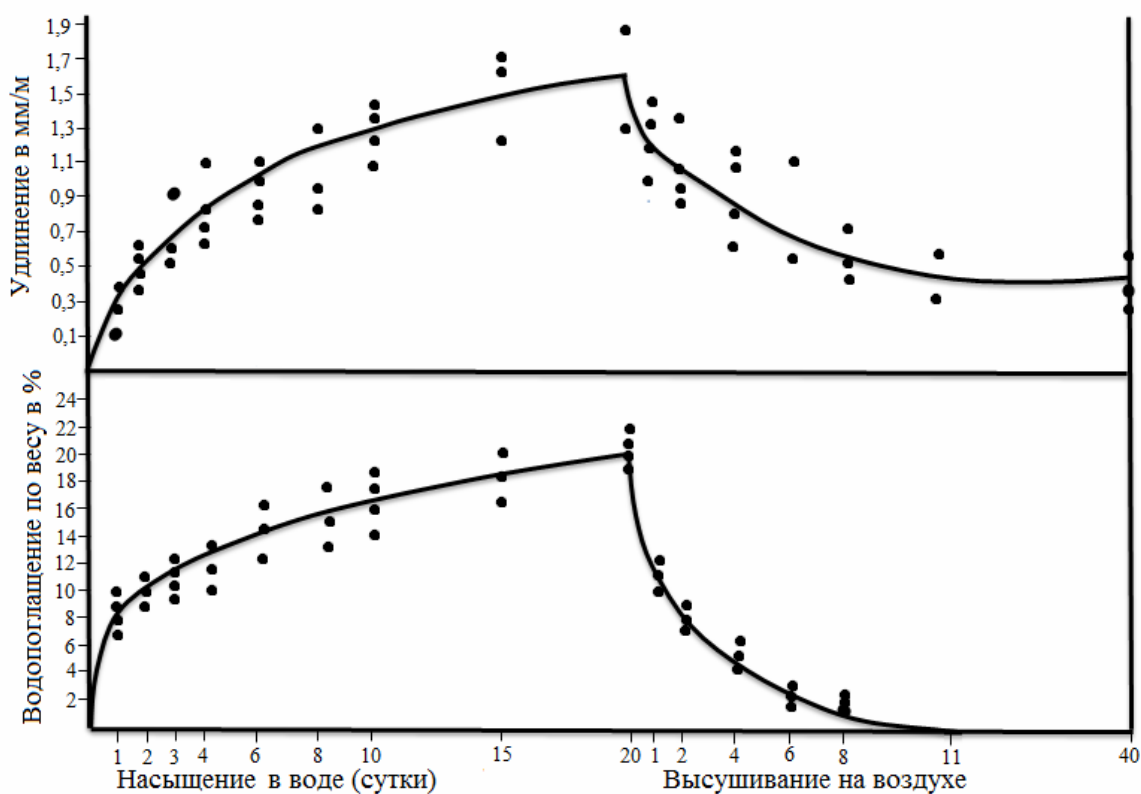


Рис. 7. Кинетика изменения водосодержания и линейных размеров ленинградского керамзита

Анализируя полученные данные рис. 5, 6, 7, следует отметить, что остаточная деформация расширения может быть различной. Она находится в пределах от 0,3 до 1,4 мм/м и зависит от структуры гранул и от степени действия первоначального напряженного состояния зерна заполнителя.

Заслуживает внимания тот факт, что для полного водонасыщения керамзита или аглопорита требуется продолжительное время. Оно превышает время, установленное стандартом, в 10 раз и составляет двадцать и более суток.

В табл. 3 приводятся средние величины водопоглощения зерен керамзита равных объемных масс в воде и в цементном тесте, если последнее имеет разную величину водоцементного отношения.



Таблица 3

Время в минутах	В цементном тесте			В воде
	В/Ц=0,4	В/Ц=0,6	В/Ц=0,8	
15	5,3	5,6	6,0	8,8
30	5,6	7,6	7,8	10,5
60	5,4	10,3	10,3	13,9
120	3,18	8,3	11,2	15,0
2 суток	-	-	-	19,8
20 суток	-	-	-	36,0

Из табл. 3 следует, что водопоглощение керамзита за двое суток, требуемых по стандарту, составляет примерно лишь 50 % от его полного водонасыщения. Для аглопорита, рис. 5, эта зависимость выражается такой же величиной.

Не меньшее значение имеет тот факт, что обратная миграция влаги из зерен заполнителя в цементное тесто происходит вскоре после приготовления бетонной смеси. В зависимости от водоцементного отношения она начинается: при В/Ц = 0,4 через 30-60 мин., при В/Ц = 0,6 через 60-120 мин. и т.д. Таким образом, характерной особенностью пористых заполнителей является не только способность длительно поглощать влагу, но и короткий период аккумуляции ее с обратной отдачей в цементное тесто.

Говоря о полезном действии процесса “вакуумирования” (по М.З. Симонову), следует учитывать и негативную сторону явления, выражающуюся в обратном поступлении влаги, когда структура цементного камня только начинает формироваться. В конечном итоге, чем больше будет отсос влаги в зерно заполнителя, тем в большем количестве она будет мигрировать в обратном направлении. В результате этого может ухудшиться структура контактного слоя, она становится более “рыхлой”, чем основная масса цементного камня.

Следует думать, что это обстоятельство в определенной степени должно влиять на морозостойкость. Кроме существенного изменения капиллярной пористости, вызванного изменением водосодержания бетонной смеси, должно иметь место и нарушение контактного слоя в результате миграции влаги. Так, по нашим данным, миграция влаги в период 1-2 часов после затворения при водоцементном отношении в смеси, равном 0,4-0,6, в 5-10 раз больше, чем в бетонной смеси при В/Ц = 0,3.

Отрицательная особенность обратной миграции влаги этим не ограничивается. Обращаясь вновь к рис. 5, 6, 7, можно видеть, как

изменяются размеры зерна заполнителя при уменьшении его влаго-содержания. Следовательно, можно ожидать определенной деформации сжатия заполнителя. Она будет тем больше, чем выше начальная влажность гранул. Этот дополнительный фактор также может вести к ослаблению контактной зоны и силы сцепления заполнителя с раствором.

Сказанным авторы не ставят себе целью отрицать полезность “вакуумирования”. Однако диалектика рассматриваемого явления, вероятно, такова, что оно имеет как положительные, так и отрицательные особенности, на последние мы и хотим обратить внимание.

Иное положение имеет место, когда происходит увлажнение и насыщение водой затвердевшего бетона. Здесь длительное поглощение влаги и увеличение в объеме гранул заполнителя должно приводить к положительному результату. Действительно, высокая водонепроницаемость легкого бетона на пористых заполнителях была отмечена в работах И.Н. Ахвердова [1] и Т.Е. Шалимо [76].

В результате увеличения объема как заполнителя, так и цементного камня создается двухстороннее обжатие, обеспечивающее очень высокую степень сцепления с цементным камнем и обжатие самого пористого заполнителя.

В итоге можно утверждать, что предварительное насыщение пористого заполнителя водой практически не контролируемо, в этом – главная причина его нежелательности. Поглощение же влаги затвердевшим бетоном ведет к положительному изменению его структуры, поэтому не может вызывать каких-либо опасений.

#### **2.4. Влияние степени водосодержания керамзита на его прочностные характеристики и изменения структуры**

Высказанные соображения о положительных последствиях длительного увлажнения заполнителей в легких бетонах вызывают необходимость непосредственной проверки насыщенных зерен керамзита на прочность и упругость. Как известно, соответствующий показатель снижения прочности керамических материалов называется коэффициентом размягчения. Допустимая величина последнего должна быть обоснована в разрабатываемых технических условиях на крупные пористые заполнители для высокопрочных легких бетонов.

Исходя из сказанного, в настоящем исследовании были поставлены следующие задачи:

1) определение влияния степени водосодержания керамзита на его прочностные характеристики;

2) изучение структурных изменений в гранулах керамзита в зависимости от водосодержания и времени контактирования последних с водой.

В исследованиях использовался Куйбышевский керамзит фракции 10-20 марки 700. Керамзит насыщался в воде различные сроки до 210 суток. В намеченные сроки керамзит испытывали по ГОСТ в стальном цилиндре, одну часть в насыщенном водой состоянии, другую – после высушивания до постоянного веса в сушильном шкафу при  $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Данные опытов, полученные как средние показатели из пяти проб – испытаний, представлены в табл.4.

Т а б л и ц а 4

Показатели	Длительность насыщения керамзита водой в сутках								
	6 час.	1	3	7	15	30	60	120	210
1.Весовое водопоглощение керамзита, в %	7,27	12,0	14,4	15,8	19,0	22,4	23,1	25,08	32,4
2.Прочность керамзита в насыщенном водой состоянии, в кгс\см <sup>2</sup>	73,0	68,5	66,8	71,4	73,6	73,0	71,4	71,4	73,0
3.Прочность керамзита в сухом состоянии, в кгс\см <sup>2</sup>	75,5	74,0	70,0	65,4	75,2	71,4	69,0	73,0	73,6
4.Коэффициент размягчения керамзита	1,06	1,0	0,98	1,04	1,08	1,06	1,04	1,04	1,06

Результаты испытаний в различные сроки говорят о том, что прочность керамзита как в насыщенном, так и высушенном состоянии не уменьшается, а, напротив, даже растет по сравнению с эталонной. За эталонную прочность принята прочность керамзита, испытанного в естественном воздушно-сухом состоянии перед началом эксперимента, которая была равна 68,3 кгс/см<sup>2</sup>.

В работе [51] сообщаются аналогичные результаты, полученные на мысковском керамзите фракции 10-20 мм.

При объяснении этого явления следует исходить из напряженного состояния заполнителя. В данном случае, по-видимому, при воздействии активной среды, воды, на заполнитель снижение остаточных напряжений превалирует над процессом снижения уровня свободной поверхностной энергии гранул керамзита. А также в результате уменьшения упругой энергии действие воды вызывает появление пучка микротрещин в вершинах естественных трещин, дефектов структуры, что, в свою очередь, приводит к росту энергии разрушения материалов.

Сошко А.И. и др. [77] полагают, что “жидкие поверхностно-активные среды, находящиеся в вершинах трещин разрушения, ускоряют нарастание раскрытия последних (результат снижения уровня свободной поверхностной энергии), а также вызывают появление пучка микротрещин в вершине искусственного концентратора или естественной трещины, что, в свою очередь, приводит к росту энергии разрушения. Снижение уровня поверхностной энергии является термодинамически неизбежным результатом адсорбции, а возникновение пучка микротрещин в устье концентратора или других дефектов возможно только при определенных условиях. К этим условиям, в основном, относятся: а) необходимый “запас” молекул жидкой среды в устье трещины, который определяется стерическим фактором, а также обязательным превышением скорости поверхностной диффузии среды над скоростью развития трещины; б) наличие определенного значения градиента напряжений в устье растущих трещин. Соотношение этих эффектов приводит, в конечном счете, к понижению или к повышению прочностных характеристик материала”.

Гидрофильность и напряженное состояние, релаксация напряжений зерен керамзита, вероятно, отвечают условиям повышения энергии его разрушения при испытании в цилиндре после длительного контакта с водой. На наш взгляд, только этим можно объяснить, что у керамзита показатель коэффициента “размягчения” больше единицы.

Для определения структурных изменений в гранулах керамзита при их длительном насыщении в воде в исследованиях был использован ультразвуковой измеритель скорости УЗИС-ЛЭТИ.

Методика исследований и подготовки образцов следующая.

Гранулы керамзита, в количестве 200 штук, для изготовления образцов отбирались из партии керамзита марки 700 фракции 10-20 мм Куйбышевского завода. После определения объемного веса в куске

каждой гранулы по методу НИИКерамзит, данная партия делилась на две равных части по 100 штук в каждой.

Критерием при делении гранул был принят объемный вес в куске, таким образом, две полученные партии были идентичны друг другу по указанному показателю –  $\rho_0$ .

Это деление было вызвано условием эксперимента, в процессе которого было установлено, что стабильная работа прибора может быть обеспечена только при параллельных и достаточно ровных контактных поверхностях. Поэтому каждая отобранная гранула обтачивалась с диаметрально противоположных сторон до оптимального размера 8-12 мм. Предварительно вторая партия, без нарушения оболочки, помещалась в эксикатор с водой, длительность насыщения была принята 130 суток. Это положение опыта было обусловлено тем, чтобы не изменить напряженного состояния зерна керамзита при нарушении его целостности.

После проделанных операций определялась скорость распространения ультразвука в сухих образцах первой серии и в предварительно насыщенных водой в течение 130 суток, а затем – высушенных до постоянного веса в сушильном шкафу при 105 °С образцах второй серии.

Измерение скорости распространения ультразвуковых колебаний в образцах твердых тел прибором УЗИС-ЛЭТИ основано на сравнении времени распространения ультразвука в образце и в эталонной жидкости, для которой скорость распространения ультразвуковой волны известна. При измерениях совмещают, вращая микрометрический винт на эталонной линии, изображения импульсов на экране прибора, то есть делают время прохождения ультразвука через эталонную и измерительную линии одинаковыми. Таких отсчетов делают два: первый без образца в измерительной линии, второй – с образцом. Разница времени прохождения ультразвука в измерительной линии без образца и с образцом определяется по длине столба жидкости, в котором время прохождения ультразвука соответствует времени прохождения в образце. Следовательно, зная длину образца  $l$ , скорость распространения ультразвука в эталонной жидкости  $V_{\text{эт}}$  и длину столба эталонной жидкости  $L$ , в котором время прохождения ультразвука соответствует времени прохождения ультразвука через образец, скорость ультразвуковых колебаний  $V_{\text{обр}}$  определится из формулы [78]:

$$V_{\text{обр}} = l/L \cdot V_{\text{эт}} . \quad (13)$$

Полученные данные обрабатывались методами математической статистики. Результаты обработки по сериям сведены в табл. 5.

Результаты экспериментов, табл. 5, свидетельствуют о том, что объемный вес в куске более изменчив, чем скорость распространения ультразвука.

Однако результаты опыта достаточно надежны, о чем свидетельствует показатель точности.

Исходя из этого, были проверены получившиеся вариационные ряды скорости ультразвука и объемного веса на нормальность распределения. После статической обработки были получены кривые, изображенные на рис. 8, которые характеризуются данными табл. 6.

Анализируя кривые распределения скорости ультразвука в гранулах керамзита, можно прийти к заключению, что длительное насыщение водой зерен заполнителя, имеющих остаточные напряжения, значительно улучшает их структуру, что проявляется в увеличении скорости ультразвука в образцах керамзита. После высушивания данных образцов кривая распределения скорости смещается в сторону увеличения последней. Смещение кривой распределения скорости ультразвука в сторону увеличения в гранулах керамзита, высушенных после длительного насыщения, вероятно, можно объяснить их более совершенной структурой, с точки зрения напряженного состояния, обусловленной релаксацией остаточных напряжений при длительном контакте с водой.

Эта экспериментальная кривая имеет достоверные положительную асимметрию и положительный эксцесс. На основании полученных данных можно полагать, что варьирование скорости распространения ультразвука в гранулах керамзита при их длительном насыщении, а затем высушивании, – не подчиняется закону нормального распределения.

Т а б л и ц а 5

№ п/п	Наименование величины	$\rho_0$ , в куске, кг/м <sup>3</sup>	$V_{уз}$ , сухих образцов, м/с	$V_{уз}$ , образцов после 130 суток насыщения, м/с	$V_{уз}$ , высушенных образцов, м/с
1.	$M$ – среднее арифметическое	1070	3183,3	3422	3774,5
2.	$G$ – среднее квадратическое отклонение	127	224,0	225	231
3.	$v$ – коэффициент изменчивости, в %	11,85 %	7,03 %	6,67 %	6,12 %
4.	$m$ – средняя ошибка среднего арифметического	12,8	22,5	22,6	23,1
5.	$p$ – показатель точности, в %	1,2 %	0,7 %	0,667 %	0,612 %

Таблица 6

№ п/п	Наименование величины	$\rho_0$ , в куске	$V_{уз}$ , сухих образцов	$V_{уз}$ , образцов после 130 суток насыщения	$V_{уз}$ , высушенных образцов
1.	$A$ – показатель асимметрии	0,735	0,427	-0,39	1,56
2.	$E$ – показатель эксцесса	0,74	1,8	0,26	2,64
3.	$m_A$ – ошибка показателя асимметрии	$\pm 0,246$	$\pm 0,246$	$\pm 0,246$	$\pm 0,246$
4.	$m_E$ – ошибка показателя эксцесса	$\pm 0,492$	$\pm 0,492$	$\pm 0,492$	$\pm 0,492$
5.	$A \setminus m_A$	$2,9 < 3$	$1,73 < 3$	$1,61 < 3$	$6,4 > 3$
6.	$E \setminus m_E$	$1,5 > 3$	$3,6 > 3$	$0,53 \ll 3$	$5,4 > 3$

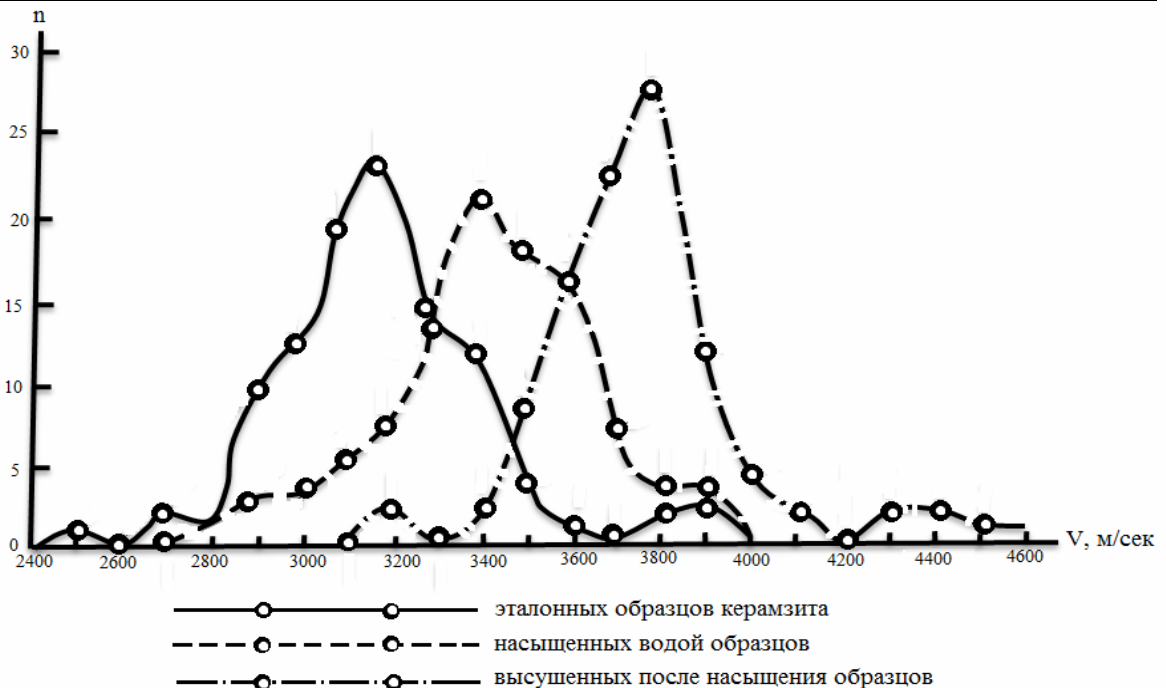


Рис. 8. Кривые распределения скорости ультразвука в гранулах керамзита

Это положение можно объяснить начальным напряженным состоянием зерен керамзита.

Проведенный эксперимент подтверждает, что в пористом заполнителе происходят физические процессы, улучшающие его структуру за счет релаксации остаточных напряжений и их перераспределения при контактировании с водной средой. Данные этого физического экспери-

мента могут быть объективным объяснением показателя коэффициента “размягчения” керамзита.

## 2.5. Исследования деформативных особенностей пористых заполнителей, вызванных попеременным насыщением в воде и высушиванием

В исследованиях были использованы искусственные пористые заполнители вышеуказанных заводов.

Основные физико-механические свойства исследуемых заполнителей приведены в табл. 7.

Методика подготовки образцов аналогична вышеизложенной в параграфе 2.3 данной главы.

Переходя к анализу полученных данных по переменному насыщению в воде (в течение трех суток весовое водопоглощение аглопорита и керамзита составило 15-20 %) и высушиванию в сушильном шкафу при 105 °С до постоянного веса образцов, необходимо сообщить наши соображения в пользу выбранной методики.

Т а б л и ц а 7

Наименование заполнителя	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>		Пористость щебня в куске, %	Водопоглощение по весу фракции 10-20 мм, %	Прочность при сжатии щебня фракции 10-20 мм ГОСТ 9758-61, кгс/см <sup>2</sup>
		Насыпной фракции 10-20 мм	В куске			
1. Аглопорит Черепановского кирпичного завода	2,6	506	1140	56,5	22,1	6,7
2. Керамзит Куйбышевского завода	2,58	700	1170	54,6	20,8	68,3



Для этого следует вернуться к рис. 5, 6, 7, на которых показаны изменения размеров зерен заполнителей при насыщении и высушивании на воздухе. Как уже отмечалось, значительные остаточные деформации как у зерен керамзита, так и зерен аглопорита, наблюдаются уже после первого цикла. Следовало этот факт не только подтвердить при циклическом воздействии среды, но и установить, для каких заполнителей его величина достигает большего значения. Сопоставление же разных заполнителей между собой необходимо осуществлять при одинаковой влажности, которую можно достигнуть только при сушке до постоянства веса. Поскольку он (вес) достигается для разных заполнителей за разные промежутки времени, было решено применить искусственную сушку. При этом возникают дополнительные напряжения в результате действия температурного поля. Учитывая небольшие размеры гранул и малую вероятность возникновения, в процессе сушки, каких-либо новообразований, мы считали такую методику, для относительного сопоставления полученных результатов, вполне приемлемой.

Все измерения образцов на компараторе проводились при температуре материала 20-22 °С, таким образом фиксируемые деформации не могут возникать вследствие разности температур до и после сушки.

Полученные нами результаты с первого взгляда могут показаться неожиданными и противоречивыми. Однако мы неоднократно проверяли указанные опыты, и есть уверенность в достаточной объективности выявленных результатов.

Обращаясь к рис. 9, 10 и 11, можно установить их характерные особенности при явной цикличности проявляющихся деформаций. Характерные особенности, прежде всего, сводятся к значительной индивидуальности каждой гранулы, хотя они и выбираются из одного и того же материала. Не только величина, но даже знак деформаций (расширение или сжатие) у них могут быть различными.



Рис. 9. Наиболее характерное проявление деформаций гранулами керамзита при их переменном насыщении в воде и высушивании

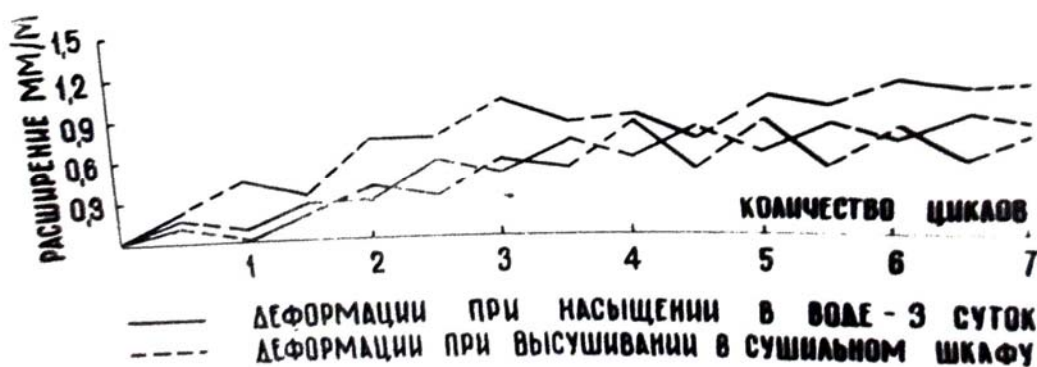


Рис. 10. Наиболее характерное проявление деформаций гранулами керамзита при их переменном насыщении в воде и высушивании после снятия с них спекшейся оболочки

Однако, выделяя наиболее массовые и характерные результаты, можно видеть, что после первого цикла насыщения аглопорита и керамзита водой и увеличения их размеров, последующие циклы высушивания и насыщения приводят к деформациям расширения вместо предполагаемого сжатия и сжатию вместо предполагаемого расширения. Такое, на первый взгляд, парадоксальное явление отмечается и в работе на силикагеле [79]. Следовательно, сам факт существования его в технике не может отрицаться.

Каково объяснение причин явления, показанного на рис. 9, 10 и 11? Следует думать, что обнаруженная аномалия вызвана, прежде всего, напряженным состоянием заполнителя, возникающим при быстром охлаждении. Действительно, исходя из теории, разработанной [80], о действии молекулярно-поверхностных сил, изменяющих свою интенсивность при колебаниях влажности твердого тела, можно полагать следующее.

Согласно представлениям П.А. Ребиндера, происходит адсорбционное воздействие активной среды, в частности, воды, на гидрофильные материалы. Действие адсорбированных слоев жидкости сводится к их двумерной диффузии вдоль микротрещин до стерического препятствия. Если высушивание происходит при повышенной температуре, вязкость воды снижается, и ее миграция в микротрещины может происходить быстрее. Напряженное состояние заполнителя усиливает его деформативность (в данном случае расширение) в результате совместного действия расклинивающих водных молекулярных пленок и упругого расширения материала вследствие снижения первоначального напряжения сжатия.

Выявленная нами усадка и расширение искусственных пористых заполнителей при изменении их влажности колеблется в широких пределах.

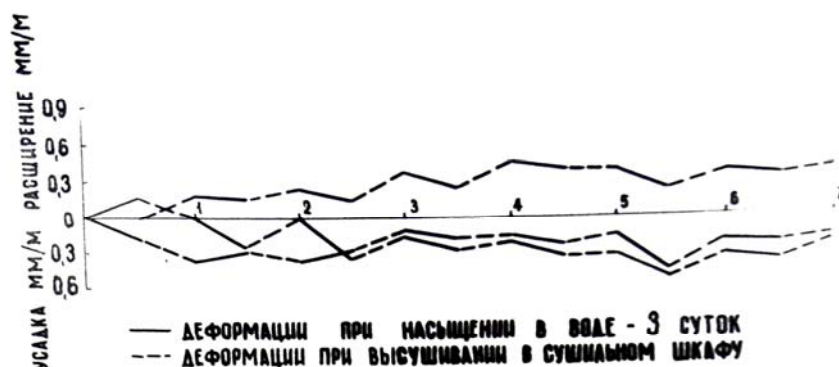


Рис. 11. Наиболее характерное проявление деформаций аглопоритовыми образцами при переменном насыщении их в воде и высушивании

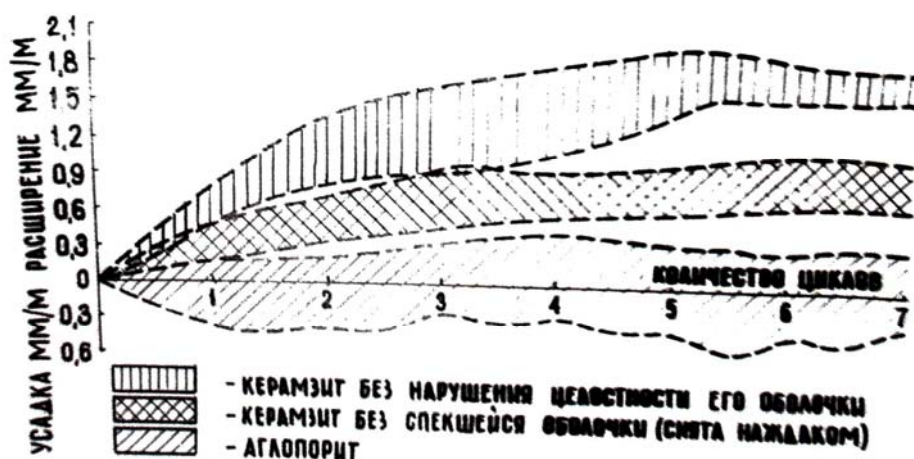


Рис. 12. Характер деформаций пористости заполнителей при их переменном насыщении в воде и высушивании в зависимости от напряженного состояния структуры последних

Изменение объема составляет величину порядка усадки и расширения цементного камня, и даже превосходит их.

Сопоставление величин деформаций разных заполнителей подтверждает высказанные соображения о влиянии на них первоначального напряженного состояния материала. Действительно, из рис. 12 видно, что:

1) снятие наружной, более плотной, оболочки с зерна керамзита снижает величину его деформаций;

2) зерна аглопорита имеют меньшие деформации, чем гранулы керамзита.

Следовательно, описанные явления дают новые факты, позволяющие утверждать хотя и известное, но не всеми разделяемое положение о большей однородности аглопорита перед керамзитом.

Подсчитав по средней величине деформаций и модулю деформаций возникающие в керамзите напряжения, легко убедиться в том, что они значительно превышают его прочность на разрыв.

Однако мы не наблюдаем каких-либо признаков разрушения. Лишь предварительно-напряженное состояние гранулы керамзита может объяснить это явление. Насыщение водой как бы снимает вначале напряжения сжатия в оболочке, но затем, по мере насыщения, может создать напряжения и обратного знака, т.е. растяжения.

Как видно, при определенной степени водонасыщения, можно значительно снизить начальные напряжения в заполнителе до нуля, однако это не управляемый процесс. Поэтому следует присоединиться к мнению ряда специалистов, считающих предварительное увлажнение керамзитового гравия вредным и нежелательным.

Начальные напряжения заполнителей следует снижать в процессе их пиропластического производства.

## 2.6. Характеристики деформированного и напряженного состояний аглопорита при сжатии

Изучение работы различных пористых заполнителей в легком бетоне под нагрузкой вызывает значительные трудности экспериментального характера. Выяснение этого вопроса, а именно, как влияют прочностные и деформативные характеристики пористого заполнителя на распределение напряжений в легком бетоне под нагрузкой, имеет большое практическое значение. Это позволит обоснованно установить требования к качеству заполнителей и более научно назначать состав легкого бетона.

Профессор Гвоздев А.А. и Берг О.Я. в своем докладе на VI конференции по бетону и железобетону обратили внимание на необходимость более широкого рассмотрения деформативных свойств бетона и, в том числе, признания как упруго-хрупких, так и упруго-пластичных свойств этого материала.

Исходя из этого, нам представляется, что решению задач, указанных выше, в некоторой степени будет способствовать выяснение

вопроса, каковы характеристики деформированного и напряженного состояний пористого заполнителя при сжатии.

Исследования, посвященные этому вопросу, нам не известны. Электрическая тензометрия открывает возможность провести экспериментальные работы в этом направлении.

Опыты проводились на образцах из аглопорита.

Были изготовлены призмочки размером  $2 \times 2 \times 6$  и  $2 \times 2 \times 4$  см и кубики  $2 \times 2 \times 2$  см из аглопоритового щебня. Места, предназначенные для наклейки тензодатчиков, затирали гипсовым тестом и зачищали наждачной бумагой.

Применялись датчики омического сопротивления с базой 10 и 20 мм. Омическое сопротивление – 110 и 200 Ом. С двух противоположных граней снимались поперечные деформации, с двух других – продольные.

Для получения более точной зависимости диаграммы  $\sigma - \epsilon$ , требовалось постепенное нарастание нагрузки с весьма малой интенсивностью, что достигалось применением динамометров сжатия ДОСМ-0,5 и ДОСМ-5.

В работе использовался электронный измеритель деформации АИД-1М.

Методика проведения эксперимента такова. Подготовленный образец устанавливали на динамометр и производили его центрирование по продольным деформациям при усилии 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки. После центрирования образец разгружали до условного нуля, нагрузка на образец – 0,01 от ожидаемой разрушающей. Показания датчиков при этом усилии принимались за начальные отсчеты.

Дальнейшее нагружение образца до его разрушения производили возрастающими ступенями, составляющими 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки с выдержкой на каждой ступени загрузки по 20 мин.

Отсчеты тензодатчиков на каждой ступени брались сразу после нагружения (для определения мгновенных деформаций), и вторично после 20-и минутной выдержки при данном нагружении (для определения полных деформаций).

Показания тензодатчиков снимались вплоть до разрушения образца. Было испытано 40 образцов. На основании полученных данных построены графики рис. 13 и 14.

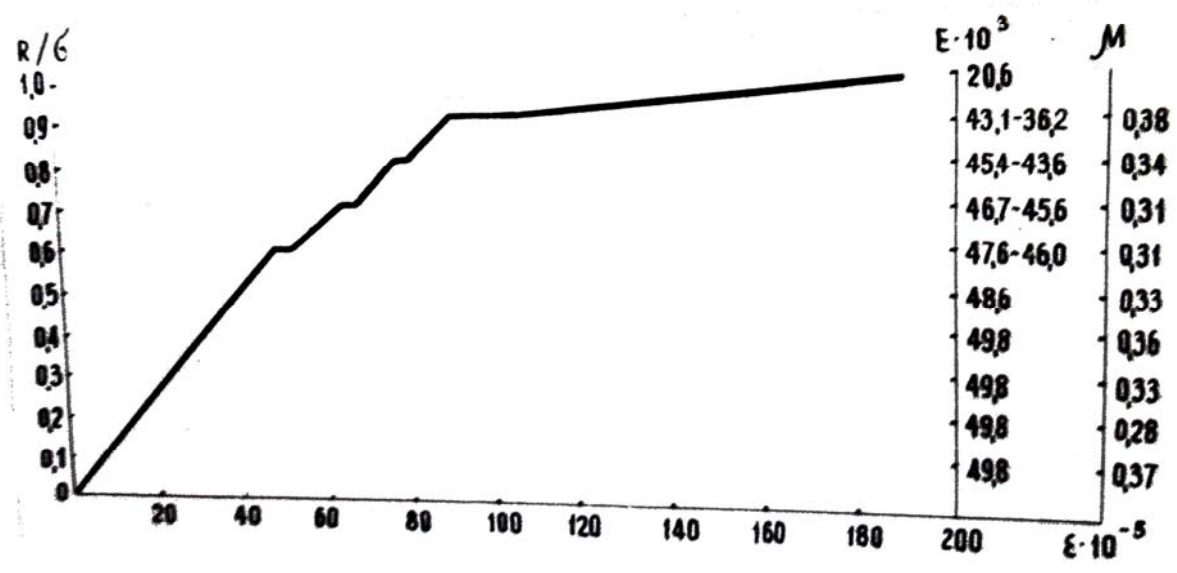
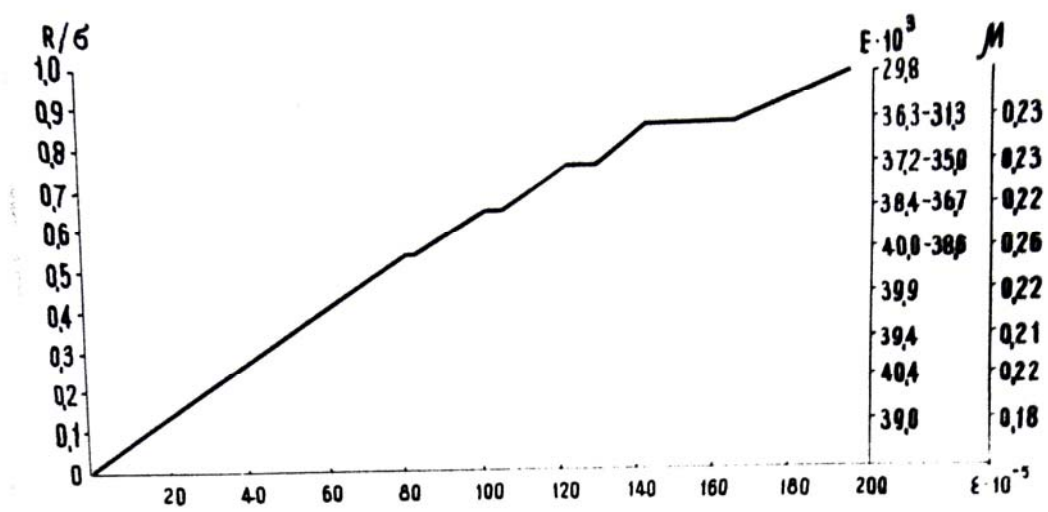


Рис. 13. Наиболее характерные по виду диаграммы деформаций аглопорита

На рис. 13 представлены наиболее характерные по виду диаграммы деформаций аглопорита объемным весом в куске 0,76-0,88 г/см<sup>3</sup>, который определялся в образцах правильной формы

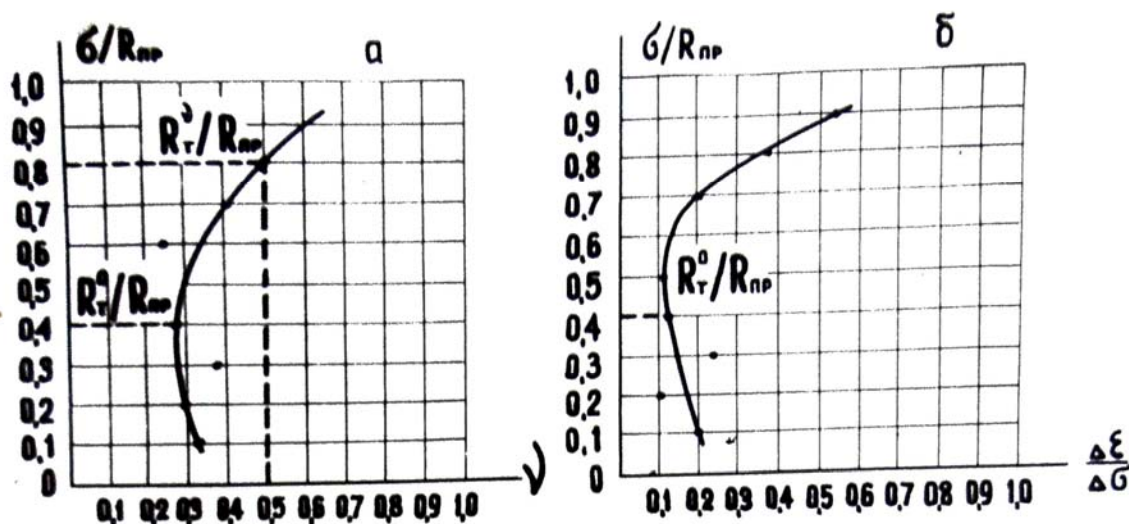


Рис. 14. Характеристики деформированного и напряженного состояний аглопоритовых образцов при сжатии:  
 а – по изменению дифференциального коэффициента поперечной деформации  $\nu$ ;  
 б – по изменению величины удельных поперечных деформаций  $\Delta \varepsilon_2 / \Delta \sigma$

Анализируя полученные диаграммы, необходимо отметить, что с повышением напряжений до 40-60 % от разрушающих, в большинстве опытов отмечалось увеличение жесткости аглопорита. Аналогичные данные сообщаются в работе [81] для таких пород, как гранит, базальт, известняк.

Увеличение модуля упругости аглопорита, по-видимому, можно объяснить повышением его плотности в результате закрытия микротрещин, возникающих в нем в процессе его производства [68].

Интересно отметить и то обстоятельство, что аглопорит проявляет деформации ползучести. Предельная сжимаемость аглопорита, полученная в наших опытах, находилась в пределах 1,2-2,0 мм/м.

В связи с этим отметим, что М.З. Симонов получил значения предельной сжимаемости для керамзитобетона 1,85-1,90 мм/м [5]. Эти данные указывают на тесную зависимость деформативных свойств бетона от деформативности заполнителя.

Коэффициент Пуассона характеризовался величиной 0,18-0,38, что согласуется с данными других авторов.

На основании экспериментальных данных были построены характеристики деформативного и напряженного состояний аглопоритовых образцов при сжатии – рис.14, по изменению дифференциального коэффициента поперечной деформации  $\nu$  и по изменению величины удельных поперечных деформаций  $\Delta\varepsilon_2/\Delta\sigma$ .

Полученный характер кривых и расположение параметрических точек  $R^o_T$  и  $R^{\nu}_T$ , характеризующие микроразрушения аглопорита, по внешнему виду близки к подобным характеристикам для бетона.

Первая параметрическая точка  $R^o_T$  определялась началом роста величины  $\nu = \Delta\varepsilon_2 \setminus \Delta\varepsilon_1$  с повышением нагрузки. Вторая  $R^{\nu}_T$  – достижением значения  $\Delta\varepsilon_2 \setminus \Delta\varepsilon_1 = 0,5$ , где  $\Delta\varepsilon_1$  – приращение продольной деформации на данной ступени нагрузки;  $\Delta\varepsilon_2$  – то же, поперечной деформации.

Полученные графические характеристики деформированного и напряженного состояний аглопорита являются вполне положительными. Нижняя граница появления микротрещин соответствует пределу напряжения порядка 40-50 % от разрушающего. Это говорит о хороших перспективах долговечности и стойкости аглопоритобетона, малых пластических деформациях его под нагрузкой, если последняя не превышает 50 % от разрушающей.

Верхняя граница развития микротрещин предшествует критическому состоянию материала при разрушении, однако, последнее не наступает мгновенно и аглопорит теряет сплошность с повышением действующего напряжения еще на 20 %.



### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

#### 3.1. Исследование эффекта обжатия на плоской модели

##### 3.1.1. Исследование эффекта обжатия в зависимости от пористости цементного камня

За последние годы в производстве и применении легких бетонов осуществлен значительный прогресс. Однако мы не имеем еще общепринятой теории прочности легких бетонов. Следует думать, что её создание является одной из основных задач ближайшего будущего. Закономерно также то, что дальнейший прогресс в этом направлении невозможен без изучения совместной работы пористого заполнителя и цементного раствора.

Структурная теория прочности рассматривает разрушение бетона при сжатии как следствие трёх возможных критических состояний материала:

1. разрыв заполнителя при высокой прочности цементного камня;
2. раскалывание или разрыв цементного камня;
3. нарушение сцепления между заполнителями и цементным камнем.

Для легких бетонов повышенной прочности характерным является первый случай разрушения – от разрыва пористого заполнителя. В связи с этим прочность заполнителя на разрыв в значительной мере предопределяет возможность достижения высокой марки легкого бетона. Об этом говорят данные ряда исследований, в частности, профессора М.З. Симонова [16].

Проф. И.А.Иванов с сотрудниками [13, 14] показал влияние всестороннего обжатия пористого заполнителя в бетоне на повышение его растяжимости. На факт существования всестороннего обжатия пористого заполнителя указано и в работе С.Е. Фрайфельда [67].

Развивая исследования в этом направлении, стало возможным непосредственно изучить предварительное обжатие заполнителя обжимом цементного камня.

Значительные экспериментальные и фактические данные, накопленные нами, позволяют предложить гипотезу «об эффекте предварительного обжатия пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в легком бетоне». Сущность гипотезы состоит в том, что пористый заполнитель окружен в бетоне облойкой из раствора (цементного камня), в результате усадки которой происходит предварительное (до появления эксплуатационных напряжений) обжатие заполнителя. Последнее существенно повышает растяжимость и прочность пористого заполнителя на разрыв.

Основываясь на исследованиях проф. И.Н. Ахвердова и А.Е. Шейкина, необходимо отметить, что явление обжатия пористого заполнителя имеет более сложный характер по сравнению с первоначальным нашим представлением о нем.

Набухание реакционных каемок цементных частичек, окружающих заполнитель, при обратной миграции влаги из последнего в цементный камень – приводит к возникновению значительного давления – набухания, по И.Н. Ахвердову. Процесс набухания реакционных каемок проходит одновременно с усадкой бетонного образца, т.е. эти два явления накладываются друг на друга.

Аккумулированная заполнителем вода будет отсасываться твердеющим цементным камнем, вследствие диффузионного характера гидратации цемента и наличия разницы химического потенциала раствора через реакционную каемку цементных частиц. В результате этого развивается существенное осмотическое давление, по А.Е. Шейкину, в направлении меньшей концентрации раствора, в данном случае – к поверхности пористого заполнителя, что, естественно, ведет к обжатию заполнителя. Получая деформацию обжатия, заполнитель будет отжимать из себя излишек воды так, что снова будет создавать разность химического потенциала и существование осмотического давления.

Весь этот комплекс явлений: самопроизвольная влажностная усадка, набухание реакционных каемок и осмотическое давление, – наиболее полно будет характеризовать эффект обжатия пористого заполнителя в легком бетоне.

Как известно, применяемые сейчас методы исследования разработаны лишь для бетона как конгломератного материала, или для пористых заполнителей, отдельно взятых от раствора. Непосредственно изучение сложного напряженного состояния зерен заполнителя, находящегося в бетоне, на современном этапе вряд ли возможно. Поэтому нами предложена структурная модель бетона – рис. 15. Она

представляет собой комбинированный образец, состоящий из зерен пористого заполнителя (аглопорит, керамзит) и окружающего его цементного раствора.

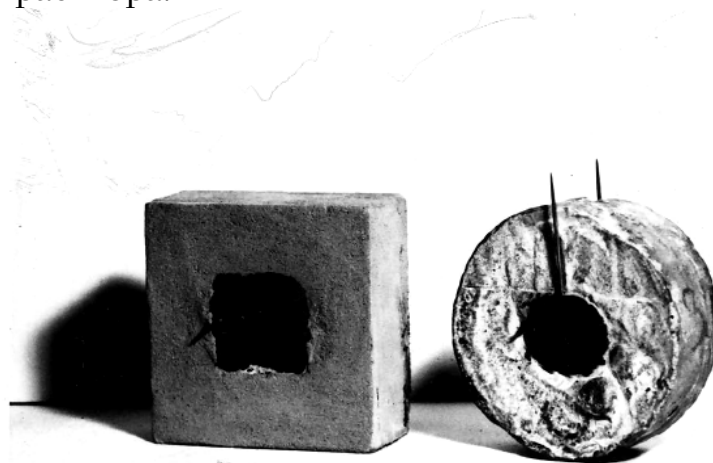


Рис. 15. Образцы структурной модели легкого бетона для плосконапряженного состояния

Предлагаемая структурная модель легкого бетона дает возможность проводить следующие экспериментальные исследования:

1. определять величину напряжения и деформаций отдельно для пористого заполнителя и цементного раствора в любом интересующем нас направлении;

2. устанавливать рациональные режимы твердения, при которых сохраняется монолитность цементной обоймы;

3. определить прочность пористого заполнителя на разрыв;

4. изучать предварительное обжигание пористого заполнителя при твердении легких бетонов.

Изучение совместной работы заполнителя и цементного раствора на предложенной модели расширит наши представления о влиянии структуры бетона на прочность, и будет способствовать решению ряда вопросов, связанных с разработкой теории прочности легких бетонов.

В исследованиях были использованы цементы различного минералогического состава и активности. Их характеристики приведены в табл. 8. В качестве мелкого заполнителя применялись вольский песок и сурский с  $M_{кр}=1,53$ . В опытах использовался глинистый аглопорит Черепановского кирпичного завода Новосибирской области, керамзит Саратовского ДСК марки 400 и куйбышевский керамзит марок 500, 600 и 700. В качестве вяжущего использовался портландцемент Жигулевского завода марка 500.

Таблица 8

№ п/п	Заводы	Марка цемента	ГОСТ	Минералогический состав клинкера, %				Нормальная густота цементного теста
				C <sub>3</sub> S	C <sub>4</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
1	Жигулевский комбинат стройматериалов	500	10176-62	50-53	18-22	7-8	12-13	27.0
2	Вольский «Большевик»	500	10176-62	61	17	5	14	28.0
3	Вольский «Большевик»	400	10176-62	60	17	3	16	25.7
4	Волховский	400	10176-62	58	19	6	13	27.2
5	Катав-Ивановский ШПЦ	300	10176-62	43	30	11	13	29.0
6	Днепродзержинский ШПЦ	400	10176-62	57	24	7	21	23-25

Методика проведения исследований такова. Из аглопоритового щебня изготавливались образцы – кубики размером 2×2×2 см на наждачном круге.

Керамзитовые гранулы отбирались поштучно при помощи специального трафарета, с коэффициентом формы 1,0-1,5 с наибольшим диаметром не более 20 мм.

Аглопоритовые образцы – кубики и керамзитовые гранулы закладывались в форму и по периметру обетонировались цементным тестом или раствором. Предварительно к аглопоритовым и керамзитовым образцам эпоксидной смолой ЭД-6 (отвердитель полиэтиленполиамин в количестве 15 % от веса смолы), приклеивались с двух противоположных сторон по 2 иголки, и расстояние между ними измерялось на горизонтальном компараторе ИЗА-2.

Образцы структурной модели имеют размер 5×5×2 см и диаметр 5 см и высоту 2 см, таким образом, сечение цементной обоймы составляет 1,5×2 см.

При экспериментах с аглопоритом удобнее пользоваться квадратными образцами, в случае проведения опытов с керамзитом, – комбинированные образцы могут быть квадратными и цилиндрическими.

Твердение комбинированных образцов проходило в трех режимах: в нормальных и воздушно-сухих условиях, и в пропарочной камере

после 1,5-2,0 часов предварительной выдержки по режиму 3,5+5+2 при температуре изотермии 80 °С.

Изменение размеров пористого заполнителя в результате самопроизвольной усадки цементного камня фиксировалось ежедневно путем замера базы, ограниченной реперами на оптическом длинномере ИЗА-2. Опыты проведены на аглопорите и керамзите разной объемной массы в куске от 0,7 до 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Цементное тесто обоймы применялось разной степени подвижности, а цементный камень – разной прочности, поскольку величина водоцементного отношения изменялась и составляла: 0,3; 0,4; 0,5.

Гигрометрические условия твердения оказывают на процесс усадочных деформаций образцов решающее воздействие. Однако характер этого процесса может существенно меняться в зависимости от пористости заполнителя и цементного камня.

Так, при наличии нормальных условий твердения, аглопоритовый заполнитель воспринимает от цементной обоймы напряжения различного знака – рис. 16, хотя условия твердения для всех образцов не меняются.

При объемной массе аглопорита  $\gamma_{об}=750$  кг/м<sup>3</sup> и, соответственно, практически предельной величине пористости наблюдается набухание заполнителя, интенсивность которого снижается с увеличением водоцементного отношения обоймы.

Для аглопорита более плотной структуры –  $\gamma_{об}=850-900$  кг/м<sup>3</sup>, набухание происходит лишь в первые сутки, а далее, в соответствии с повышением величины водоцементного отношения обоймы, интенсивность обжатия заполнителя возрастает. Таким образом, при твердении в нормальных условиях, когда процесс гидратации и сопутствующие явления изменения объема цементного камня развиваются медленно, установить четкую картину предварительного обжатия аглопоритового заполнителя не удастся.

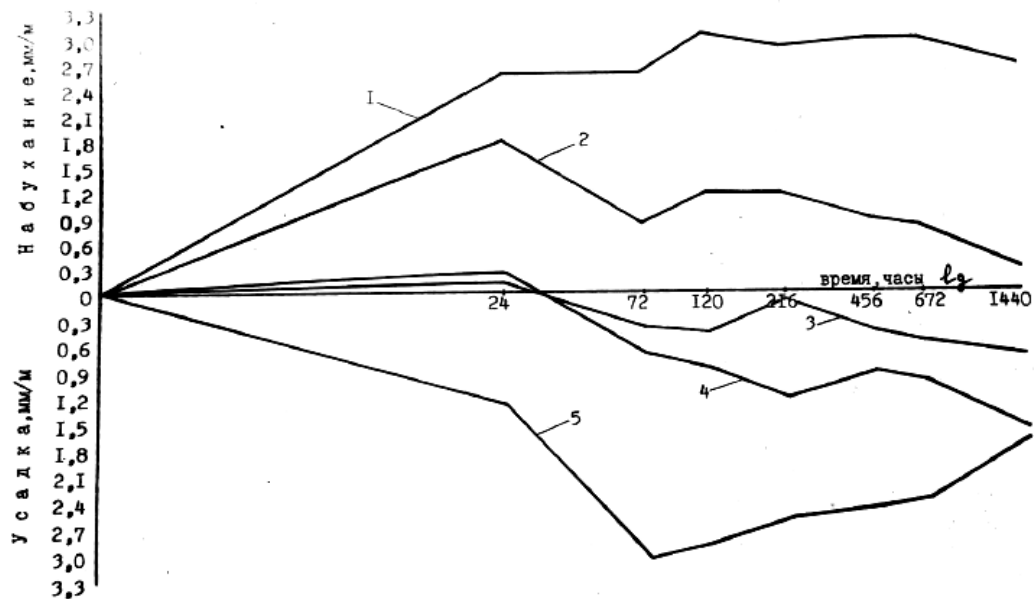


Рис. 16. Обжатие аглопоритового заполнителя цементной облойкой при нормальных условиях твердения:  
 1, 2 – объемная масса аглопорита  $750 \text{ кг/м}^3$ ;  
 3, 4, 5 – объемная масса аглопорита  $850-900 \text{ кг/м}^3$ ,  
 1, 3 –  $V/C=0,3$ ; 2, 4 –  $V/C=0,4$ ; 5 –  $V/C=0,5$

Интенсификация процесса твердения (пропарка) приводит к более четкому выявлению эффекта предварительного обжатия. На рис. 17 представлено изменение размеров аглопорита в зависимости от его объемной массы и водоцементного отношения облойки комбинированных образцов.

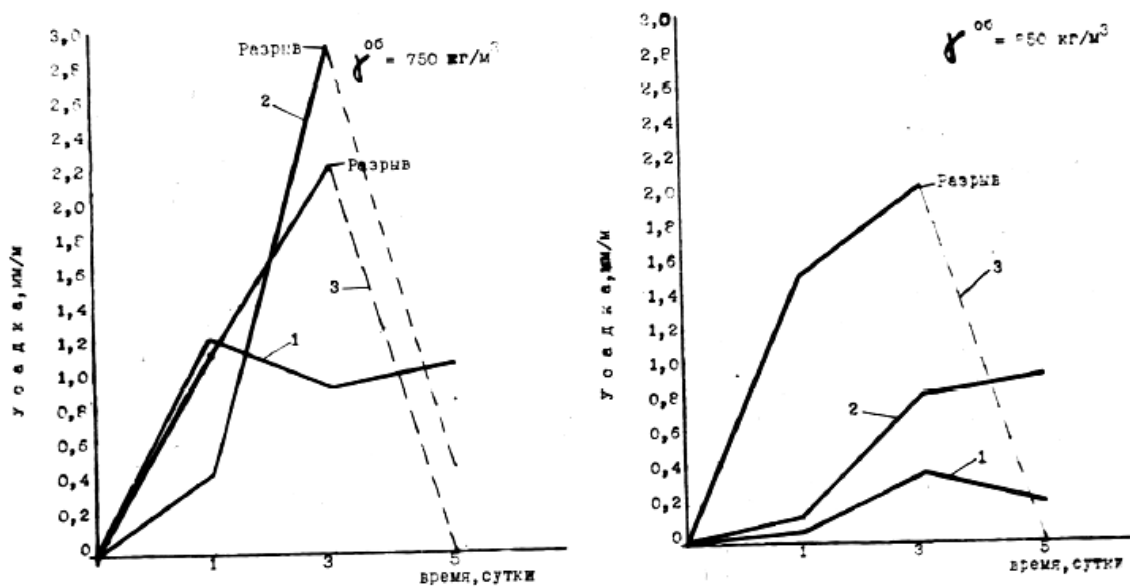


Рис. 17. Обжатие аглопоритового заполнителя цементной облойкой после пропаривания:  
 1, 3 –  $V/C=0,3$ ; 2, 4 –  $V/C=0,4$ ; 5 –  $V/C=0,5$

Заполнитель получает обжатие в пределах от 0,35 до 2,0 мм/м и более. Более пористый, следовательно, и более деформативный аглопорит, имеет большую величину обжатия.

Влияние химико-минералогического состава вяжущих и их активности на процесс обжатия пористого заполнителя исследовалось нами на вольском портландцементе и днепродзержинском шлакопортландцементе М 400 и Катаев-Ивановском ШПЦ М 300 при воздушно-сухих условиях твердения.

На рис. 18 показаны полученные в наших опытах деформации усадки цементного камня и деформации обжатия аглопорита.

Цементное тесто для каждого вяжущего было изготовлено при  $V/C=1,6K_{нт}$ .

Деформация усадки исследуемых цементов замерялись на балочках  $3 \times 3 \times 12$  см, изготовленных одновременно с комбинированными образцами из цементного теста одного замеса.

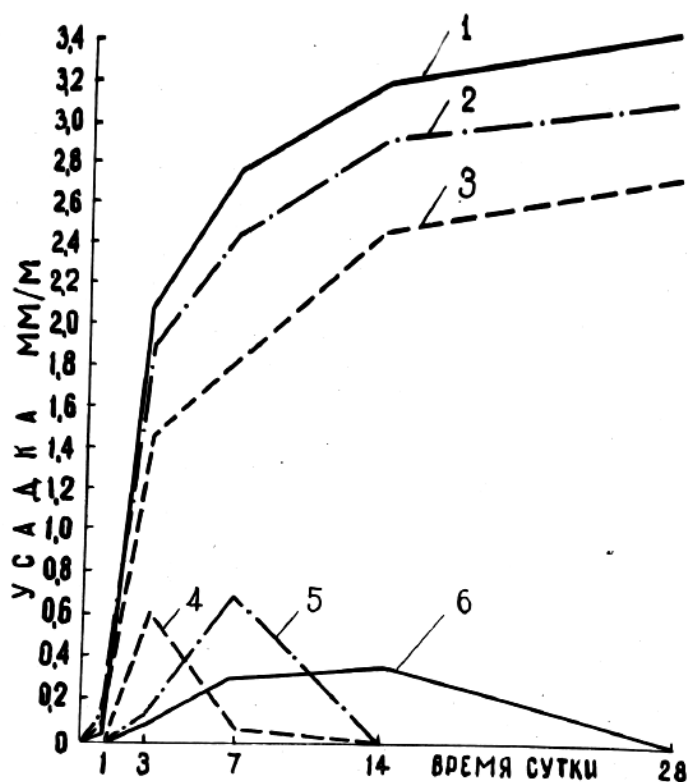


Рис. 18. Деформации усадки цементного камня и деформации обжатия аглопорита в зависимости от химического и минералогического состава вяжущих:

- 1, 2, 3 — деформации усадки; 4, 5, 6 — деформации обжатия;  
 — катаев-ивановский шлакопортландцемент;  
 - - - - - днепродзержинский шлакопортландцемент;  
 - - - - - вольский портландцемент

Анализируя полученные результаты рис. 18, необходимо отметить, что практическое действие эффекта обжатия пористого заполнителя находится в прямой связи с прочностью обоймы на растяжение. Монолитность её обычно нарушается в результате появления микротрещин.

Появление микротрещин наблюдается сразу после пропарки или через 2-3 суток после неё. При воздушно-сухих условиях твердения микротрещины возникают через 3 суток и в более поздние сроки в зависимости от минералогического состава цемента.

При появлении трещин эффект предварительного обжатия аглопорита и керамзита теряется в результате упругого расширения заполнителя, как это видно на рис. 17 и 18. И цементный камень (раствор) «упрочняет» заполнитель лишь в результате стесненных деформаций последнего, как это показано В.К. Балавадзе [82].

Закономерно, что обжатие заполнителя может сохраняться при повышении прочности цементной обоймы или уменьшении интенсивности усадки её. Тот и другой результат достигаются снижением водоцементного отношения. Из анализа данных рис. 17 следует, что безопасная величина предварительного обжатия аглопорита, исходя из возможности сохранения монолитности цементной обоймы, зависит от объемной массы заполнителя и находится в пределах 0,8-1,2 мм/м.

Следует отметить, что на величину и кинетику обжатия заполнителя оказывает сильное влияние минералогический состав цемента и его марка.

Как видно из опытных данных – рис. 18, в начальные сроки твердения повышенной интенсивностью и относительной величиной деформации обжатия отличается вольский портландцемент по сравнению с днепродзержинским и катав-ивановским шлакопортландцементами.

Однако интенсивное проявление усадки цементного камня в начальные сроки его твердения приводит к появлению микротрещин в обойме структурной ячейки. Так как модуль деформации цементного камня в эти сроки незначительно превышает модуль деформации заполнителя, это приводит к значительной задержке деформаций усадки цементного камня, следствием чего является возникновение в последнем тангенциальных растягивающих напряжений, которые обуславливают появление микротрещин в обойме из цементного камня.

Несмотря на то, что усадка примененных шлакопортландцементов и превышает усадку вольского портландцемента в указанные сроки, возникновение микротрещин в цементной обойме из этих вяжущих мы наблюдаем лишь в возрасте 7 суток и более.

По-видимому, это можно объяснить более пластичной структурой цементного камня, характеризующейся повышенным содержанием  $C_2S$



и  $C_4AF$  [24], и, в связи с этим, благоприятными условиями для релаксации возникающих задержанных деформаций усадки-обжатия.

Теоретическое и практическое значение эффекта предварительного обжатия пористого заполнителя в бетоне весьма существенно. Оценить его реальный эффект возможно лишь при изучении упругих характеристик заполнителя.

Применяя электрическую тензометрию, мы определяли модуль деформации аглопорита с различной объемной массой в зерне.

Исходя из установленной нами в предыдущем параграфе величины модуля деформации, принимаемой 40-50 тыс. кгс/см<sup>2</sup>, и допуская деформацию обжатия аглопорита 0,3-0,8 мм/м, получаем величину предварительного напряжения пористого заполнителя в пределах 12-40 кгс/см<sup>2</sup>. Этот показатель в несколько раз превышает предельную прочность заполнителя на разрыв.

Таким образом, эффект предварительного обжатия пористого заполнителя повышает его предельные деформации на стадии разрушения в бетоне, что подтверждается и результатами опытов Ю.Е. Корниловича и Ю.Д. Нациевского [8].

Прочность керамзитобетона при сжатии, по А.И. Ваганову [3], обусловлена предельной растяжимостью данного заполнителя. Им введено представление о существовании двух фаз в процессе нарастания прочности легкого бетона. В пределах первой фазы предельная растяжимость раствора меньше предельной растяжимости заполнителя, а в пределах второй фазы – больше, как это показано на рис. 19.

Анализируя экспериментальные данные, полученные нами по предварительному обжатию пористого заполнителя, следует отметить, что теория, разработанная проф. А.И. Вагановым [3], требует определенной корректировки. Высказанное им положение о том, что «... в легком бетоне растяжимость заполнителя является постоянной, а растяжимость раствора переменной, непрерывно возрастающей величиной», – требует уточнения и дальнейшей разработки.

Реальное положение таково, что растяжимость как растворной части легкого бетона, так и пористого заполнителя может существенно изменяться. Эффект предварительного обжатия находится в обратной зависимости к модулю упругости заполнителя, существенное влияние на него оказывает также гранулометрический состав раствора, водоцементное отношение, активность и минералогический состав цемента.

Проведенные нами исследования по изучению взаимодействия и взаимного влияния компонентов легкого бетона позволяют утверждать, что растяжимость заполнителя является также возрастающей

величиной. Наиболее наглядное представление об изменении предельной растяжимости составляющих конгломератов показано на рис. 19, а.

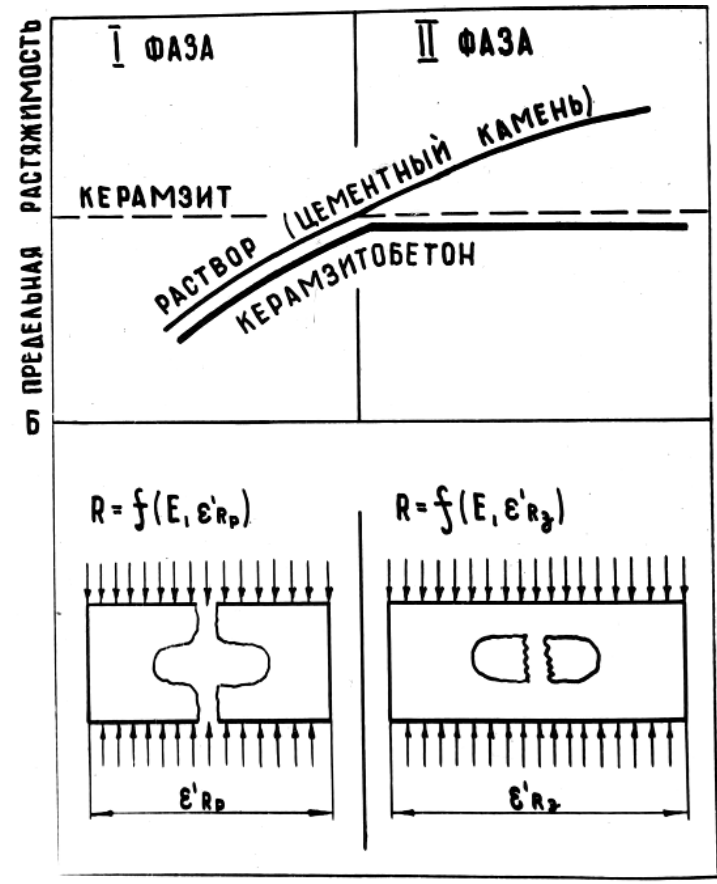


Рис. 19. Характер начального разрушения керамзита для I и II фаз

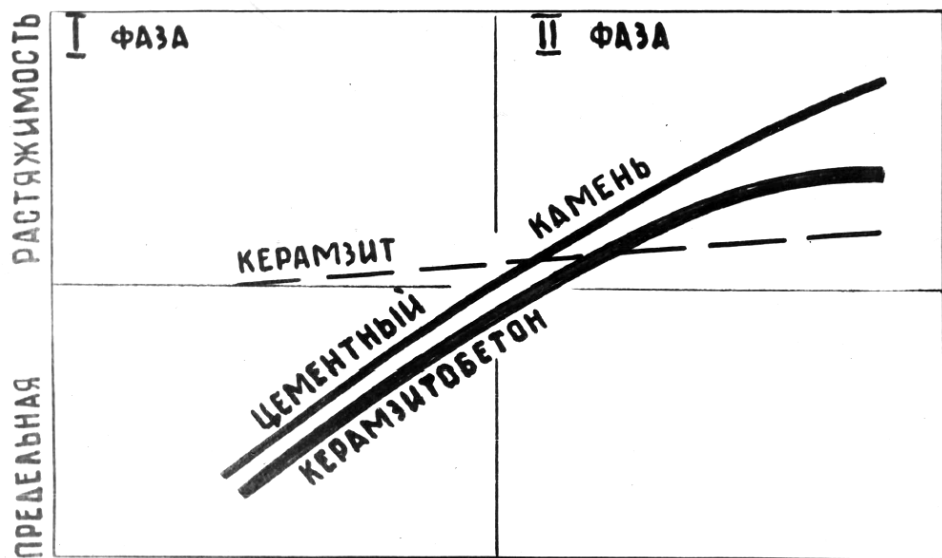


Рис. 19,а. Предельная растяжимость компонентов легкого бетона с учетом эффекта предварительного обжатия заполнителя

### 3.1.2. Исследование эффекта обжатия в зависимости от структуры и упругих свойств заполнителя

Большое влияние внутренних напряжений на деформацию и прочность бетона отмечали в своих работах А.А. Гвоздев, А.В. Белов, А.Е. Десов, В.М. Москвин, Б.Г. Скрамтаев, А.Е. Шейкин и ряд зарубежных исследователей.

Так, А.Е. Десов [47] полагает, что расхождение между теорией и опытом объединяется, главным образом, тем, что существующие теории прочности не учитывают влияния внутренних напряжений на деформации и прочность бетона.

Шейкин А.Е. [24] отмечает, что более существенной причиной изменения физико-механических свойств цементного камня во времени является возникновение и развитие в последнем собственных напряжений.

Гвоздев А.А. [83] указывает, что «... на поле напряжений, которое могло бы возникнуть под влиянием тех или иных заданных воздействий в идеально однородном теле, следует наложить еще вторичное поле возмущений, вызванное неоднородностью структуры».

Отсюда видна важность разграничения вида напряжений, возникающих в бетоне, и их влияния – на прочностные характеристики бетона.

Структурные напряжения, возникающие в бетоне, обуславливаются различным отношением составляющих конгломерата к воздействию влажности, температур и других факторов.

Общеизвестно, что заполнитель в бетоне препятствует свободной деформации усадки цементного камня. Это приводит к тому, что в затвердевшем бетоне появляются структурные напряжения.

Исходя из экспериментально установленного фактора – предварительного обжатия заполнителя в результате усадки обоймы из раствора – рассмотрим в зависимости от этого распределение внутренних напряжений в бетоне, обусловленных самопроизвольными деформациями усадки цементного камня, когда заполнители берутся с различным модулем деформации.

Изучение структурных напряжений, возникающих в бетоне, проводилось нами на моделях плосконапряженного состояния, показанных на рис. 15.

Определение указанных напряжений методами теории упругости в более или менее общей постановке представляет собой значительные трудности. На первом этапе изучения структурных напряжений нами была выбрана наиболее простая структурная ячейка бетона круглой

формы, где зерно заполнителя –  $\Omega_1$ , размещено в оболочке из цементного камня –  $\Omega_2$ , рис.20.

В силу малости толщины структурной ячейки можно считать, что усадка цементного камня  $\Omega_2$  происходит равномерно.

Приняты допущения, что материалы изотропны.

Модули упругости – Const.

Коэффициент температурного расширения – Const.

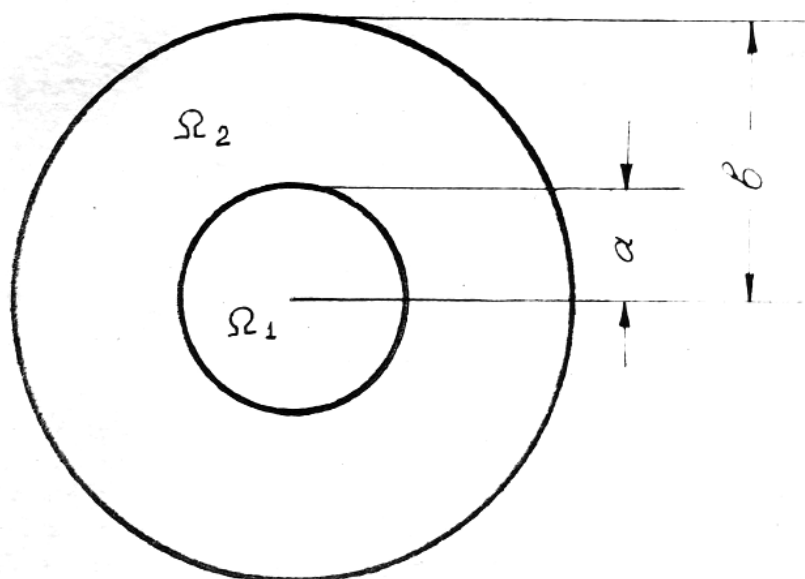


Рис. 20. Схема структурной ячейки:  
 $\Omega_1$  – зерно заполнителя;  $\Omega_2$  – цементная оболочка

Существенно упрощая решения задачи, следует признать, что принятые допущения вызывают некоторые неточности в картине распределения напряжений, однако на первом этапе исследования мы считаем это неизбежным.

Модель отдельной ячейки бетона (рис. 20) представляет собой круглый тонкий диск, состоящий, в свою очередь, из двух тел: заполнителя  $\Omega_1$  и цементного камня  $\Omega_2$ . В силу малости толщины диска можно считать, что усадка цементного камня происходит равномерно.

Тогда для определения усадочных напряжений можно использовать уравнение плоской задачи теории упругости в полярных координатах [21].

Дифференциальное уравнение равновесия:

$$d\sigma_r(r,t)/dr + [\sigma_r(r,t) - \sigma_\theta(r,t)]/r = 0, \quad (14)$$

где  $\sigma_r$  – нормальное радиальное напряжение;

$\sigma_\theta$  – нормальное тангенциальное напряжение.

Зависимость между перемещениями и деформациями:

$$\varepsilon_r(r,t) = du(r,t)/dr; \quad \varepsilon_\theta(r,t) = u(r,t)/r, \quad (15)$$

где  $u(r,t)$  – радиальное перемещение.

Условие совместности деформаций:

$$d/dr[ru(r,t)] - \varepsilon_r(r,t) = 0. \quad (16)$$

Зависимость деформаций от напряжений [84]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(r,t) &= \alpha\varepsilon^0(r,t) + 1/E(t) \cdot [\sigma_r(r,t) - \mu\sigma_\theta(r,t)]; \\ \varepsilon_\theta(r,t) &= \alpha\varepsilon^0(r,t) + 1/E(t) \cdot [\sigma_\theta(r,t) - \mu\sigma_r(r,t)], \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\alpha\varepsilon^0$  – относительная деформация усадки.

Здесь время  $t$  рассматривается как параметр. Зависимость напряжений и деформаций от  $t$  является следствием того, что модуль упругости в процессе твердения изменяется во времени.

К уравнениям (14)..(17) необходимо присоединить краевые условия.

Рассмотрим решение задачи в перемещениях. Для этого с помощью соотношений (17), (16) выразим напряжения через перемещение  $u$ :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= E/(1-\mu^2) \cdot [(du/dr + \mu u/r) - (1+\mu)\alpha\varepsilon^0]; \\ \sigma_\theta &= E/(1-\mu^2) \cdot [(u/r + \mu du/dr) - (1+\mu)\alpha\varepsilon^0]. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя (18) в (14), получим уравнение равновесия в перемещениях

$$d/dr \cdot 1/r \cdot d/dr(ru) = (1+\mu)\alpha d\varepsilon^0/dr. \quad (19)$$

В случае равномерной усадки  $d\varepsilon^0/dr = 0$  и, следовательно, уравнение (19) упрощается

$$d/dr \cdot 1/r \cdot d/dr(ru) = 0. \quad (20)$$

Для решения задачи составное тело (рис. 21) разделили на два тела,  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , и их взаимодействие заменили неизвестными силами  $P_a$  (рис. 22).

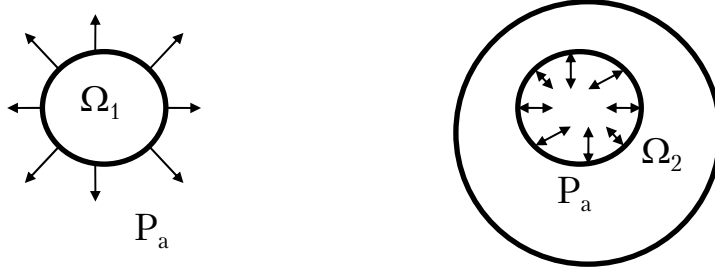


Рис. 21. Схема взаимодействия сил

Решим уравнение (20) для каждого тела. Все величины, относящиеся к телам  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , будем обозначать соответственно индексами “1” и “2”.

Общее решение уравнения (20) для тела  $\Omega_1$  будет

$$u_1 = A_1 r + B_1 \cdot 1/r.$$

Так как при  $r = 0$   $u_1 = 0$ , то  $B_1 = 0$  и

$$u_1 = A_1 r. \quad (21)$$

Постоянную  $A_1$  определяем из условия при  $r = a$   $\sigma_{1r} = P_a$ .

Для этого по первой формуле (19) находим  $\sigma_r$  при условии, что  $\alpha_1 \varepsilon_1^0 = 0$ ,  $\sigma_{1r} = E_1 / (1 - \mu_1)^2 \cdot (A_1 + \mu_1 A_1)$ ,

отсюда

$$A_1 = ((1 - \mu_1) \cdot P_a) / E_1, \quad u_1 = ((1 - \mu_1) \cdot P_a) / E_1. \quad (22)$$

Общее решение задачи для тела  $\Omega_2$

$$u_2 = A_2 r + B_2 / r. \quad (23)$$

Для определения  $A_2$ ,  $B_2$  используем краевые условия:

$$\begin{aligned} r = a, \quad \sigma_{2r} &= P_a, \\ r = b, \quad \sigma_{2r} &= 0. \end{aligned}$$

Выражая краевые условия с помощью (18) через перемещение  $u_2$ , получим

$$\begin{aligned} E_2 / (1 - \mu^2) \cdot \left[ (A_2 - B_2 / a^2) + \mu_2 (A_2 + B_2 / a^2) - (1 + \mu_2) \alpha_2 \varepsilon_2^0 \right] &= P_a; \\ E_2 / (1 - \mu^2) \cdot \left[ (A_2 - B_2 / b^2) + \mu_2 (A_2 + B_2 / b^2) - (1 + \mu_2) \alpha_2 \varepsilon_2^0 \right] &= 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Из системы (24) определим  $A_2$ ,  $B_2$  и подставим в (23). Тем самым, перемещение  $u_2$  будет определено. Неизвестные силы взаимодействия  $P_a$  определим из условия совместности деформаций тел  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , то есть при  $r = a$ ,  $u_1 = u_2$ .

После выполнения этих действия получим окончательное решение

$$u_1 = -(1 - \mu_1) E_2 / E_1 \cdot (\alpha_2 \varepsilon_2^0) / \gamma, \quad (25)$$

$$\sigma_{1r} = \sigma_{1\theta} = - \left( E_2 \cdot (\alpha_2 \varepsilon_2^0) \right) / \gamma, \quad (26)$$

$$u_2 = [(1 - \mu_2)\delta/\gamma - 1]\alpha_2\varepsilon_2^0 r + (1 + \mu_2)\delta\alpha_2\varepsilon_2^0/\gamma \cdot b^2/r, \quad (27)$$

$$\sigma_{2r} = -[(b/r)^2 - 1]\delta/\gamma E_2(\alpha_2\varepsilon_2^0), \quad (28)$$

$$\sigma_{2\theta} = [(b/r)^2 + 1]\delta/\gamma E_2(\alpha_2\varepsilon_2^0), \quad (29)$$

где  $\gamma = [(2\delta + 1) + \mu_2 + E_2/E_1(1 - \mu_1)]$ ;

$\delta = V_{\Omega 1}/V_{\Omega 2}$  отношение объема заполнителя к объему цементного камня.

Чтобы выяснить влияние упругих свойств заполнителя и отношения объема заполнителя к объему цементного камня на начальные внутренние напряжения по зависимостям (26), (29) и (29), построены эпюры напряжений (рис. 22) при следующих данных:

1) пористый заполнитель

$$E_1 = 0,07 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2; \mu_1 = 0,28; \delta = 0,15; 0,4 \text{ и } 1,0.$$

2) плотный заполнитель

$$E_1 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2; \mu_1 = 0,11; \delta = 0,15; 0,4 \text{ и } 1,0.$$

3) цементный камень

$$E_2 = 0,3 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2; \mu_2 = 0,18; \alpha_2\varepsilon_2^0 = 1,5 \cdot 10^{-3}.$$

Из анализа полученных эпюр (рис. 22) следует:

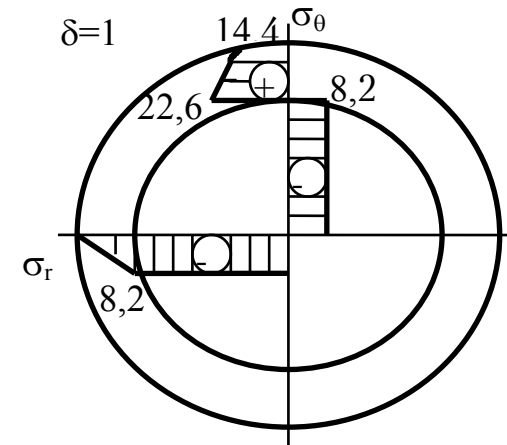
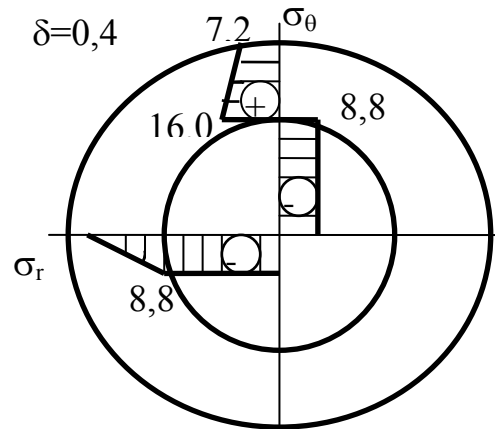
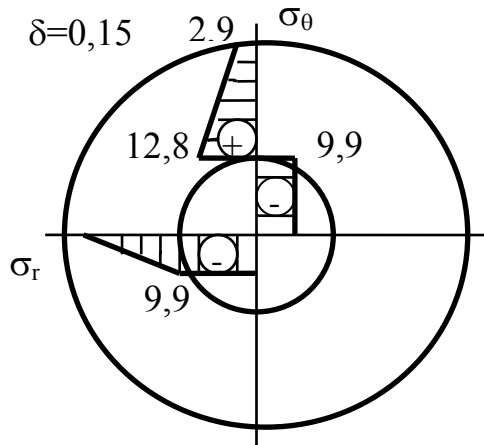
1) распределение напряжений предопределяется модулем упругости заполнителя и степенью насыщения модели заполнителем;

2) заполнитель находится в однородном напряженном состоянии всестороннего сжатия, цементная обойма в сложном напряженном состоянии как растяжения, так и сжатия;

3) концентрация напряжений в контактном слое резко повышается с повышением степени насыщения заполнителя, что равносильно уменьшению толщины обоймы;

4) теоретические результаты позволяют сформулировать гипотезу об эффекте предварительного обжатия пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в бетоне. Пористый заполнитель за счет эффекта обжатия разгружает цементный камень (раствор), повышая его усадочную трещиностойкость.

Пористый наполнитель



Плотный наполнитель

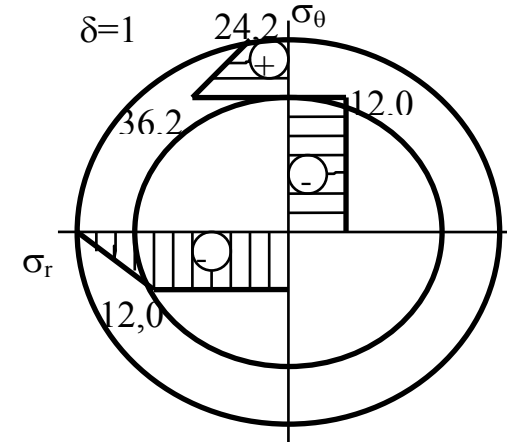
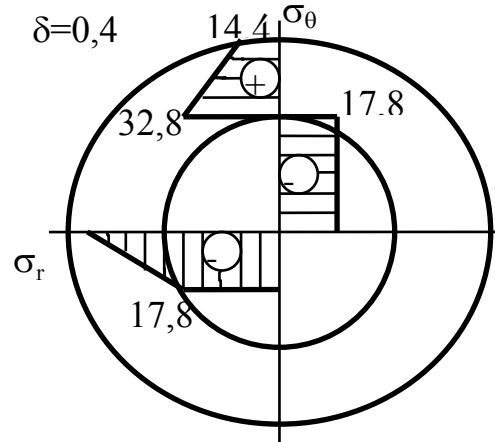
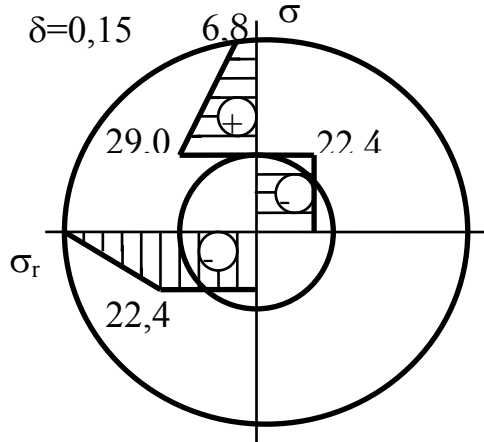


Рис. 22. Распределение структурных напряжений в модели бетона в зависимости от модуля упругости и объемного содержания наполнителя



### 3.1.3. Исследование эффекта обжатия пористого заполнителя в зависимости от состава матричной составляющей

Опыты проводились на растворах различного состава, а именно: 1:0,5; 1:1; 1:2. Методика изготовления и подготовка к испытанию образцов структурной модели изложена в п. 3.1.1. Для изготовления образцов применялись аглопорит, портландцемент марки 500 Вольского цементного завода и вольский песок. Водоцементное отношение в растворах указанных составов было принято равным 0,35. Для смачивания поверхности песка добавляли 4 % воды от его веса. Одновременно с одного замеса были изготовлены балочки 3×3×12 см для определения усадки растворов. После распалубливания образцы хранились в лаборатории при относительной влажности воздуха 80 % и температуре  $(20\pm 2)$  °С.

Деформации усадки раствора и обжатия заполнителя фиксировались ежедневно на компараторе ИЗА-2.

Полученные в опытах результаты представлены на рис. 23. Исходя из этих данных, необходимо отметить, что обжатие заполнителя фиксировалось не сразу, а лишь в возрасте образцов двое и более суток.

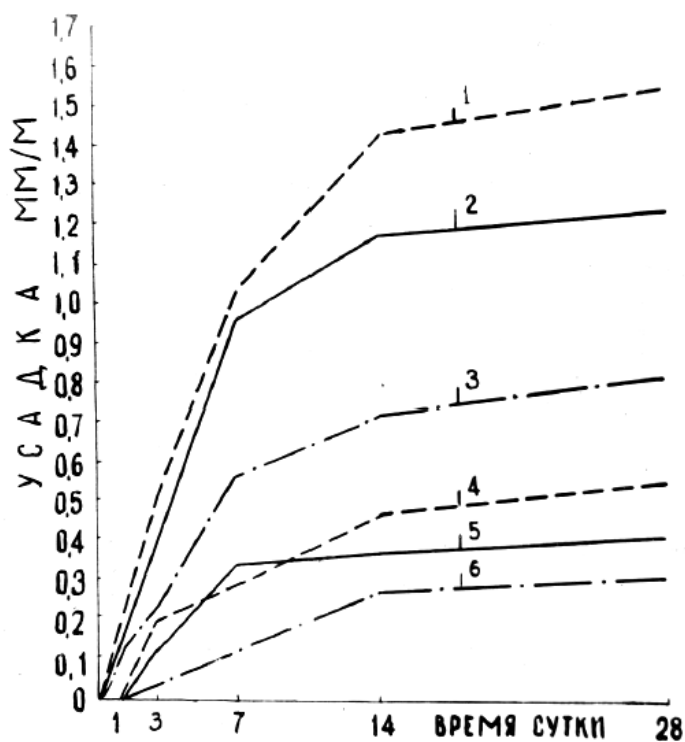


Рис. 23. Деформации усадки растворов и деформации обжатия аглопорита:  
1, 2, 3 — усадка растворов состава 1:0,5; 1:1; 1:2, соответственно;  
4, 5, 6 — деформация обжатия аглопорита на указанных растворах, соответственно

Аналогичная зависимость наблюдается и на модели из цементного камня (см. рис. 18).

Абсолютная и относительная величины деформации обжатия зависят от усадки раствора. Раствор состава 1:0,5 показал наибольшую усадку и деформацию обжатия заполнителя по сравнению с растворами состава 1:1 и 1:2.

Следует подчеркнуть, что на цементных оболочках из указанных растворов в течение всего времени эксперимента не возникали микротрещины, тогда как на образцах структурной модели из цементного камня ( $B/C=0,3; 0,4$  и  $0,5$ ), хранившихся в подобных условиях, микротрещины появлялись в возрасте образцов двое-трое суток и более. Это положение говорит о том, что эффект обжатия заполнителя и его сохранность можно регулировать гранулометрическим составом раствора.

Максимальная величина обжатия аглопорита к месячному возрасту достигает  $0,4-0,6$  мм/м. Сравнивая эти величины с соответствующими показателями для облоймы из цементного камня – рис. 18, наглядно выявляем недостатки последнего. Цементное тесто без заполнителя имеет столь большие величины усадки ( $2,0$  мм/м и более), что интенсивность нарастания эффекта обжатия действует весьма коротко-временно (в пределах 3-7 суток), после чего накопление микротрещин приводит к разрыву облоймы.

### 3.2 Исследование эффекта обжатия на объемной модели

Для исследования объемного обжатия, наиболее полно моделирующего поведение заполнителя в бетоне, нами сконструировано специальное приспособление с автоматической регистрацией деформации индикаторами часового типа с ценой деления  $0,002$  мм, рис. 24. Приспособление позволяет вести исследование эффекта обжатия в водных, нормальных и воздушно-сухих условиях твердения.

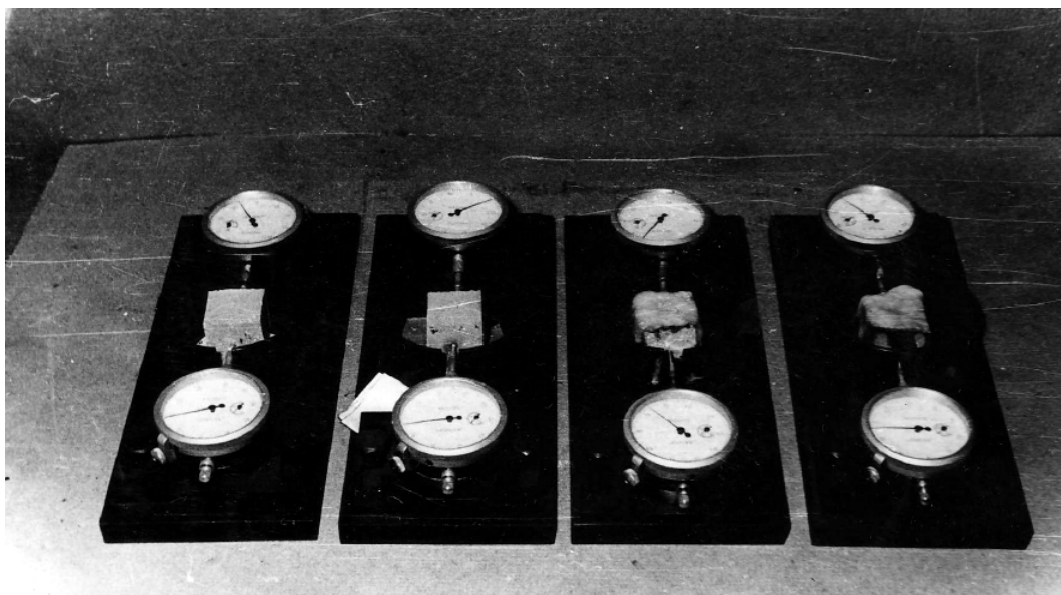


Рис. 24. Приспособление для исследования объемного обжатия пористого заполнителя

Методика эксперимента – следующая. Образцы пористого заполнителя для объемной модели готовились по методике, изложенной в п. 3.1.1. Но размер аглопоритовых образцов составлял в данном случае 15x15x15 мм. Далее к аглопоритовым и керамзитовым образцам с двух противоположных сторон, строго по оси, в торец приклеивались металлические репера, как это показано на рис. 25, эпоксидным компаундом, состав которого указан выше.

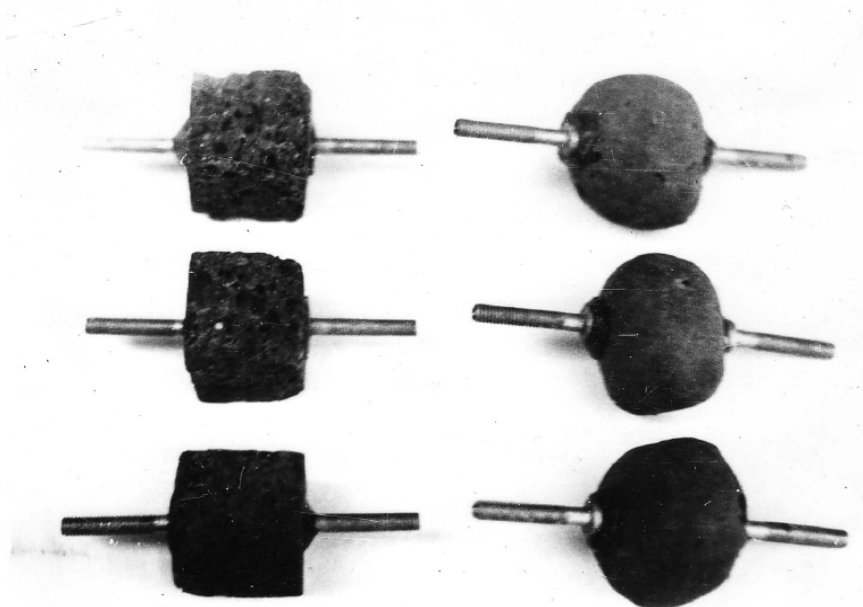


Рис. 25. Образцы аглопорита и керамзита для объемной модели

После отверждения эпоксидного компаунда на металлические репера надевали полиэтиленовые трубки диаметром 2,5-3 мм, и приклеивали их в торце клеем БФ-2. Роль указанных трубочек сводилась к тому, чтобы изолировать репера от контакта с цементным камнем или раствором в процессе формирования и твердения до распалубки объемной модели.

Формование производилось следующим образом. На дно формы укладывался слой цементного теста или раствора заданного состава, толщина слоя 1,5-2 см, предварительно в центре поддона формы просверливали отверстие диаметром 4-4,8 мм для выхода репера.

Затем через отверстие в поддоне обыкновенным гвоздем протыкали цементный раствор и по этому следу вводили репер подготовленного образца, вдавливая его в раствор так, чтобы зерно заполнителя оказалось в центре формы-кубика размером 3×3×3 см (рис. 26). Чтобы не изменить водоцементного отношения теста или раствора, заполнитель перед формованием в течение 5-10 минут насыщали водой, а затем обтирали влажной тканью. Далее заполнитель обетонировался по бокам и сверху. Таким образом, зерно заполнителя со всех сторон было окружено цементной обоймой, толщина которой составляла 7,5 мм.

В зависимости от условий твердения образцы через сутки распалубливали, с реперов выдергивали полиэтиленовые трубочки, и они оказывались изолированными от цементного камня кольцевым зазором, равным толщине стенки удаленной трубочки.

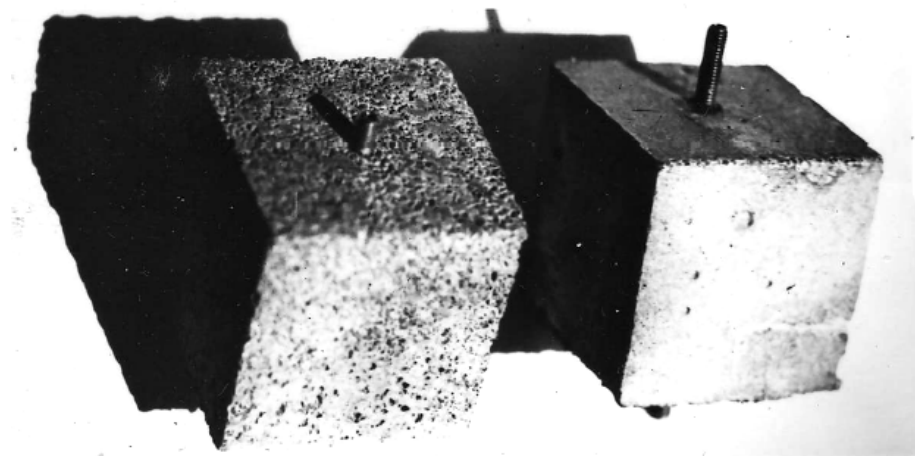


Рис. 26. Образцы объемной модели легкого бетона

Затем образцы взвешивали, устанавливали в приспособление для регистрации деформаций обжатия заполнителя при заданных экспериментом условиях твердения.

Исследование эффекта обжатия на объемной модели было проведено при различных прочностных и деформативных характеристиках цементной облоймы.

На рис. 27 показан характер деформаций зерна аглопорита, окруженного облоймой из цементного камня ( $B/C$  теста=0,4, портландцемент жигулевского завода М 500), при нормальных условиях твердения.

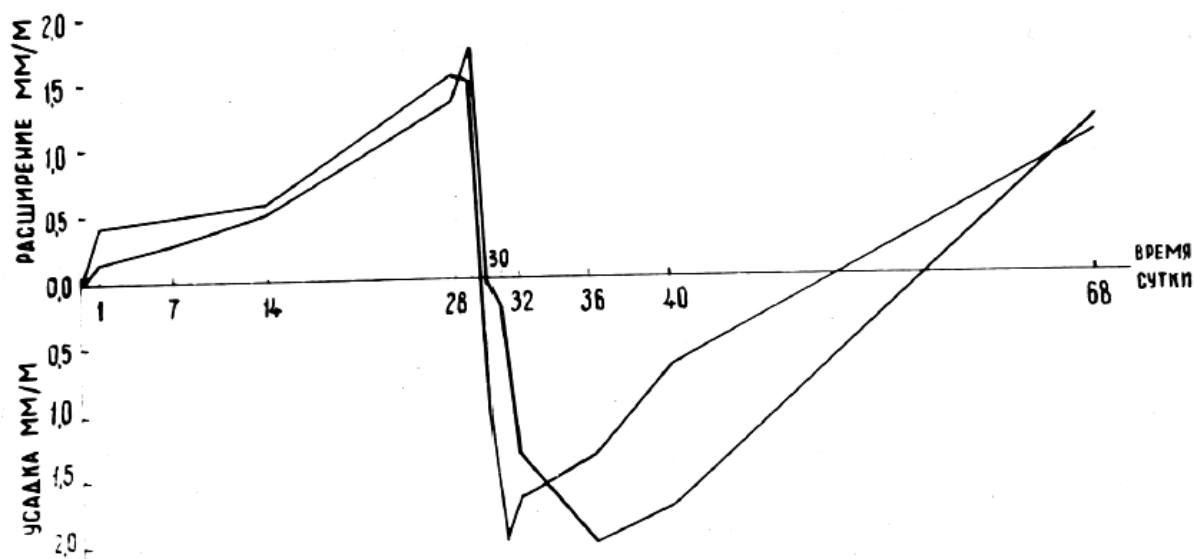


Рис. 27. Характер деформаций зерна аглопорита, окруженного облоймой из цементного камня ( $B/C=0,4$ ), при нормальных условиях твердения

Как видно из графика рис. 27, в первые 28 суток, когда образцы находились в условиях 100 %-й влажности, вместе с набуханием цементного камня проявляло деформации расширения и зерно аглопорита. После 28 дней влажного твердения образцы объемной модели переносились в помещение с относительной влажностью 54-56 %. За первые сутки в этих условиях особых изменений в характере деформации пористого заполнителя не произошло, даже наблюдалось небольшое увеличение его объема. Но уже на вторые сутки характер и кинетика деформации заполнителя резко изменились, и отчетливо фиксировалось обжатие заполнителя.

Некоторую инерционность процесса обжатия в первые сутки, на наш взгляд, можно объяснить, исходя из представлений о механизме влажностной усадки цементного камня, в зависимости от различных форм связи воды последним.

Деформации обжатия аглопорита продолжали расти до появления волосных трещин на облойме, в результате чего характер деформаций

заполнителя за счет его упругого расширения и раскрытия усадочных трещин снова изменился.

На рис. 28 представлены результаты, полученные в наших опытах, по обжатию аглопорита раствором нормальной консистенции состава 1:3, приготовленного на вольском портландцементе М 55 и вольском песке, после термовлажностной обработки образцов объемной модели по режиму: 2 часа предварительной выдержки, 2+6+естественное остывание при температуре изотермии 80 °С.

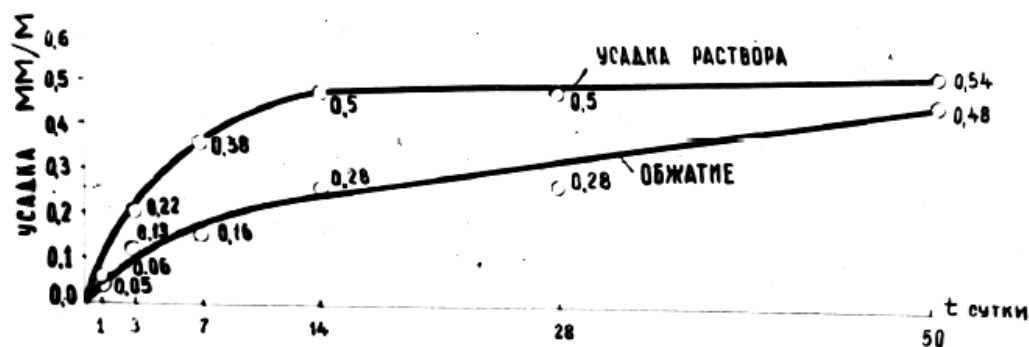


Рис. 28. Усадка раствора состава 1:3 и деформация обжатия аглопорита после пропаривания

На рис. 30 показаны деформации обжатия керамзитовых зерен,  $\rho = 0,74-0,84 \text{ г/см}^3$ , из марки 500 куйбышевского завода и усадки раствора состава 1:1 при В/Ц=0,5, на тех же материалах и аналогичных условиях термовлажностной обработки, с дополнительным контролем влагопотерь образцами объемной модели на всем протяжении эксперимента, при относительной влажности окружающей среды 50-65 %.

Рассматривая полученные данные, рис. 28 и 30, необходимо отметить, что кинетика усадки растворов (состава 1:1 и 1:3) в начальные сроки существенно опережает деформации обжатия пористых заполнителей. По-видимому, это положение можно объяснить невысокими упругими характеристиками цементной облоймы, т.к. с увеличением возраста образцов характер этих деформаций становится похожим друг на друга.

Следует подчеркнуть, что на облоймах из данных растворов в продолжение всего опыта, в течение 50 и 100 суток, появление микротрещин не наблюдалось. Эти результаты говорят о сохранении эффекта обжатия заполнителя на образцах объемной модели, в зависимости от деформаций усадки и прочностных характеристик окружающей зерно заполнителя оболочки из цементного раствора.

Помимо структурной модели нами проверялось обжатие заполнителя на балочках 4×4×16 см. Для этого был подготовлен аглопоритовый заполнитель окатанной формы диаметром 8-10 мм на

наждачном круге. Объемно насыпной вес аглопорита был равен  $536 \text{ кг/м}^3$ . Применялось отдельное бетонирование: вначале в форму укладывался и уплотнялся заполнитель, затем вводилось цементное тесто ( $V/C=0,5$ ) и после повторного вибрирования добавлялось еще некоторое количество цементного теста. Объем введенного теста равнялся объему межзерновой пустотности окатанного аглопорита, которая составляла 56 %. Чтобы не изменить водоцементное отношение, аглопорит предварительно увлажнялся. Аналогично изготавливались балочки, в которых заполнителем служили металлические шарики диаметром 8-10 мм, межзерновая пустотность равна 46 %. Через сутки балочки расплубливали и помещали в эксикатор для твердения в условиях 100 %-й влажности.

Деформации обжатия замерялись ежедневно на компараторе ИЗА-2. В течение 28 суток на балочках фиксировалось набухание, величина которого составляла на аглопоритовом заполнителе 0,25 мм/м, на металлическом – 0,12 мм/м, рис. 29.

После 28 дней твердения балочки перекладывали в лабораторные условия с относительной влажностью 55 %. Как видно из графика, уже за первые сутки балочки с заполнителем из металлических шариков, претерпевая усадку цементного камня, принимали первоначальный размер и на образцах появлялись волосные трещины. На балочках из аглопоритового заполнителя за первые сутки наблюдали деформацию обжатия, составляющую в среднем 0,15 мм/м от первоначального размера. На вторые сутки появились волосные трещины. Но количество и размеры их на сравниваемых образцах резко различны – рис. 31.

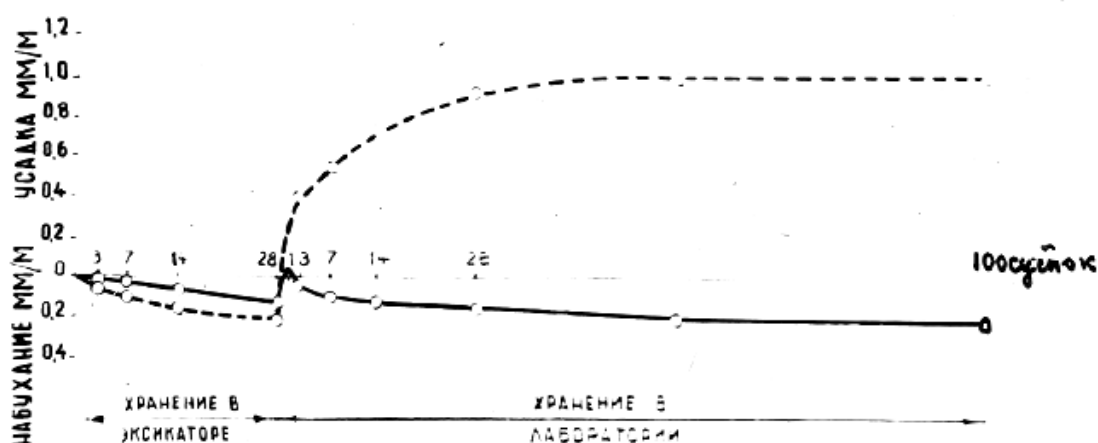


Рис. 29. Деформации обжатия на балочках:  
 — на аглопоритовом заполнителе;  
 - - - на металлическом заполнителе

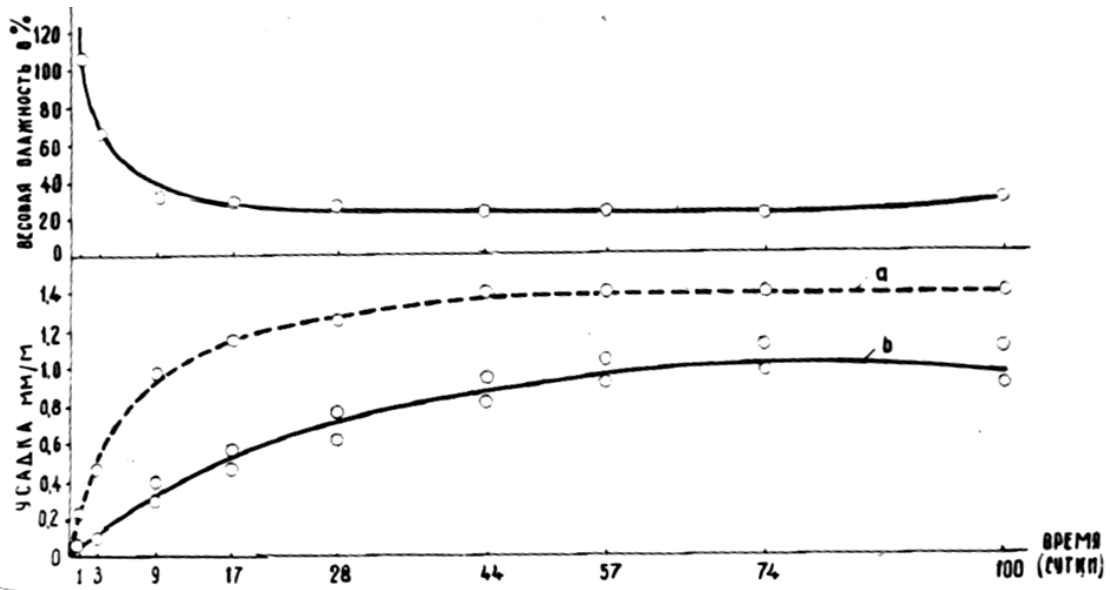


Рис. 30. Усадка раствора состава 1:1 и деформации и обжата зерна керамзита после пропаривания: *a* – усадка раствора; *b* – деформация обжата керамзита

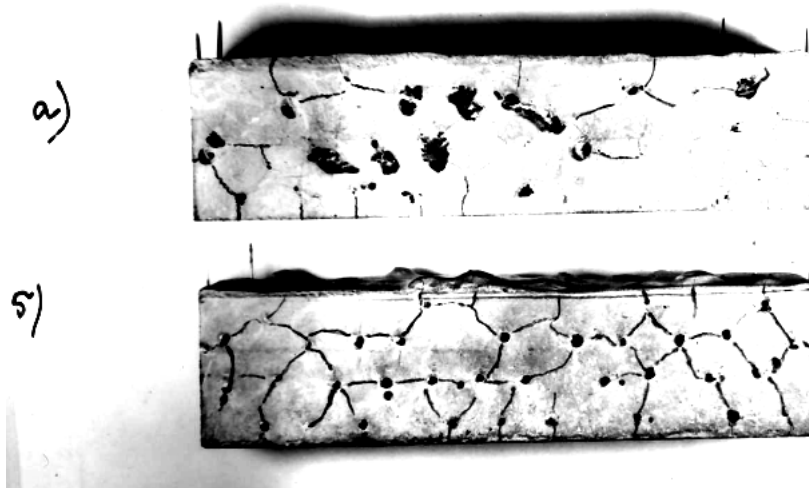


Рис. 31. Характер распределения микротрещин на балочках: *a* – на пористом заполнителе; *б* – на металлическом заполнителе

В процессе дальнейшей усадки в течение 4-7 суток предварительное обжата аглопорита достигло величины 0,4-0,7 мм/м, размер же балочек из металлических шариков стал опять увеличиваться за счет раскрытия микротрещин. На 100-120-е сутки воздушно-сухого хранения деформация обжата аглопорита составляла 1,0-1,2 мм/м, несмотря на наличие микротрещин.



В качестве вяжущего в данном опыте был использован портланд-цемент М 500 Жигулевского завода.

Проведенные опыты с объемной моделью дали весьма важные результаты. Они не только подтвердили качественно и количественно основные закономерности обжатия, полученные на плоской модели, но и позволили связать с ними деформативность заполнителя при изменении его водосодержания. Подтвержден порядок величины обжатия, который при нормальных условиях твердения достигает 0,3-0,7 мм/м.

Раскрывается сложная картина взаимодействия пористого заполнителя с цементной обоймой, достаточно наглядно показанная на рис. 27. Особого внимания достоин упругий характер деформаций обжатия, в результате которых даже при разрыве цементной обоймы можно рассчитывать на высокую степень срастания заполнителя с растворной частью бетона. Правая восходящая часть кривых на рис. 30 показывает, что заполнитель за счет упругих деформаций и хорошего сцепления следует за деформациями обоймы, возвращаясь как бы в свое исходное положение.

Подтверждается также факт набухания заполнителя, который был установлен в главе 2 на отдельных зернах аглопорита и керамзита при увлажнении.

### 3.3. Исследование эффекта обжатия пористого заполнителя в бетоне

В опытах со структурными моделями легкого бетона было показано, что в пористом заполнителе появляются деформации сжатия от сжимающейся, в результате усадки окружающей его цементной оболочки.

Переходя при изучении этого явления от структурных моделей непосредственно к бетону, представляет интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения, выяснение характера и относительной величины деформаций обжатия пористых заполнителей в зависимости от ряда технологических факторов и приемов.

Исходя из этого, были проведены исследования на образцах из керамзитобетона и аглопоритобетона с учетом влияния влажностного состояния заполнителя, влияния повторного вибрирования, влияния добавки хлористого кальция и влияния последовательности загрузки материалов при приготовлении бетонной смеси.

Непосредственное исследование эффекта предварительного обжатия было проведено на аглопоритобетоне. Для этого были подготовлены образцы аглопорита размером 11×11×18 мм с поставленными на них реперами, как это показано на рис. 32.

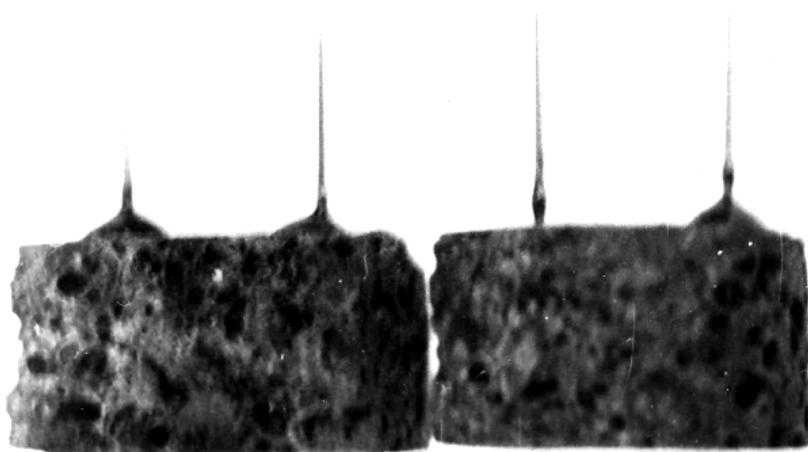


Рис. 32. Образцы аглопорита с поставленными реперами

Методика подготовки образцов изложена выше.

Подготовленные образцы аглопорита закладывали в середину балочки размером 4×4×16 см. Бетон изготавливали на аглопорите фракции 5-10 мм с коэффициентом насыщения, равным 0,4. Одна серия образцов бетона была изготовлена на сухом аглопорите, другая – на влажном (весовое водосодержание которого составляло 25 %). Однако в обеих сериях аглопоритовые образцы (рис. 32) при бетонировании были в сухом состоянии.

Для исключения контакта металлических реперов исследуемого зерна заполнителя с бетоном в процессе формования и твердения на них надевали полиэтиленовые трубочки, которые удалялись после освобождения образцов от форм.

Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона был принят следующим: вольский портландцемент марки 400 – 450 кг, аглопорит фракции 5-10 мм – 462 кг, песок сурский – 720 кг, вода – 210 л.

Кажущееся водоцементное отношение в обеих сериях было одинаковым и равнялось 0,467.

Образцы уплотнялись вибрированием на стандартной виброплощадке. В течение 24 ч образцы были выдержаны в формах, покрытых влажной тканью, после чего освобождались от форм и хранились первые 14 суток в лаборатории с относительной влажностью воздуха 80 %, а затем 14 суток в эксикаторе над хлористым кальцием.

Общий вид образцов с поставленными реперами для определения усадки бетона и деформации обжатия зерна заполнителя показан на рис. 33.



Рис. 33. Балочка из аглопорита для определения деформаций усадки и обжатия заполнителя

Деформации усадки и обжатия фиксировались в возрасте образцов 1, 3, 7, 14 и 28 суток, на горизонтальном компараторе ИЗА-2.

Результаты опытов представлены на рис. 34.

Сравнивая эти данные с результатами, полученными на структурных моделях легкого бетона рис. 28 и 30, следует отметить, что характер и величина деформаций обжатия заполнителя существенно отличаются друг от друга. По-видимому, для объяснения этого факта надо исходить из толщины цементной оболочки, окружающей зерно заполнителя, с увеличением толщины которой будут развиваться и большие радиальные давления сжатия от усадки. Этим положением, вероятно, объясняется и замедленная деформация обжатия, которая в образцах бетона фиксировалась лишь на 7 и 14 сутки.

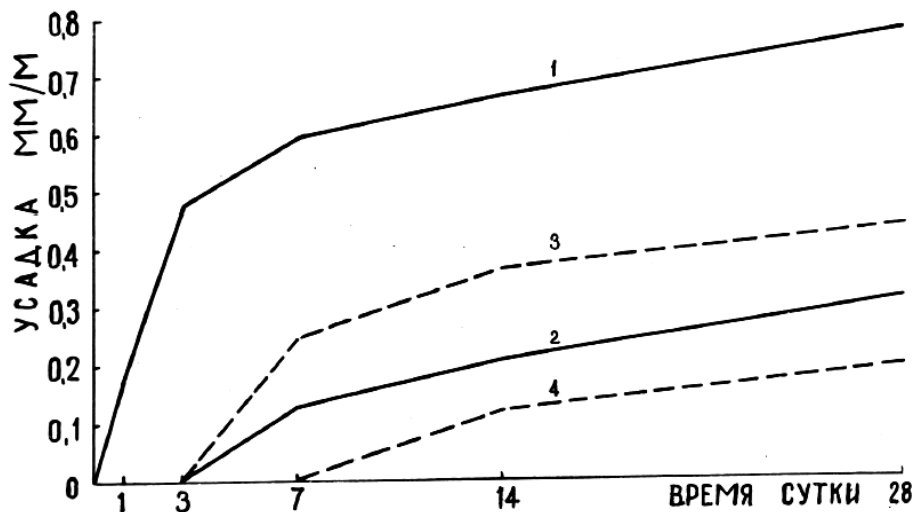


Рис. 34. Усадка бетона и деформации обжатия зерна заполнителя:  
1, 2 – усадка на сухом и влажном заполнителе, соответственно;  
3, 4 – деформации обжатия аглопорита в бетоне на сухом и влажном заполнителе, соответственно

Усадка бетона, изготовленного на предварительно замоченном аглопорите, оказалась меньше, по сравнению с образцами на сухом заполнителе, во все сроки испытания.

Деформации обжатия влажного заполнителя, как это видно из рис. 34, начинают проявляться и расти в более поздние сроки. Они имеют меньшую как абсолютную, так и относительную величину по сравнению с образцами из сухого заполнителя.

Проведенные опыты завершают серию экспериментов, в которых логическая последовательность исследований, развивающаяся от плоской модели к объемной и далее непосредственно к бетону, является доказательством реальности эффекта обжатия. Показательно, что порядок величин обжатия на всех трех этапах сохраняется неизменным. Для бетона он может быть принят равным 0,1-0,3 мм/м.

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ПРИЕМОМ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ПРОЯВЛЕНИЮ ЭФФЕКТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ

### 4.1. Вопросы корреляции усадки и прочности бетонов

Рассматривая формирование структуры и прочности легкого бетона с учетом эффекта предварительного обжата пористого заполнителя, обусловленного самопроизвольными влажностными деформациями усадки цементного камня и сопутствующими ей факторами, следует отметить, что усадка свойственна большинству строительных материалов, изготовленных на основе портландцементов.

Первые данные по усадке бетонов были опубликованы еще в 1899 г. Консидером. С тех пор влажностная усадка бетона изучалась многими исследователями, как в нашей стране, так и зарубежом, – С.В. Александровским, А.В. Беловым, Л.И. Васильевым, Г.Г. Вишневецким, В.В. Михайловым, Н.А. Мощанским, Ю.А. Нилендером, Я.В. Столяровым, З.Н. Цилосани, А.Е. Шейкиным, О. Графом, Залигером, Фрейсине, Р. Лермитом, Г. Калоузеком, Т. Пауэрсом, Т. Брауньяром и др.

Однако природа влажностной усадки бетона оказалась настолько сложной, что до настоящего времени нет еще общепризнанной интерпретации её физической сущности, поэтому она интенсивно изучается и в настоящее время.

В нашу задачу входило проиллюстрировать мнение исследователей о влиянии усадки на формирование физико-механических свойств бетона.

Работами многих ученых было показано, что в процессе затворения цемента с водой, его схватывания и твердения цементное тесто уменьшается в объеме.

Это беспрепятственное уменьшение объема продолжается до возникновения определенной структуры цементного камня, характеризующейся моментом начала схватывания цемента.

В дальнейшем свободному уменьшению объема будет препятствовать сформировавшаяся структура и непрогидратированные зерна цемента, в результате чего в цементном камне возникают внутренние напряжения, которые обычно называют структурными.

При высушивании цементного камня в нем возникает новая система напряжений, обусловленная неравномерным удалением влаги из образца и неоднородной усадкой.

Переходя к рассмотрению механизма усадки бетона, следует отметить, что дополнительным очагом возникновения структурных

напряжений в последнем являются частицы крупного заполнителя. Влияние реологических свойств заполнителя на эти напряжения велико, как это показано в ряде исследований [1, 34, 37, 47].

Исходя из представлений об усадке, бетон обычно изучают как двухфазную систему, полагая, что заполнители в процессе формирования структуры бетона не меняют своих свойств и не подвержены усадке.

На основании опытов легкий бетон, в частности аглопоритобетон и керамзитобетон, с точки зрения усадки, по-видимому, можно рассматривать как биактивную систему, так как с физической точки зрения данные заполнители активно влияют на характер усадки бетона и формирование его структуры и прочности.

Такой подход к легкому бетону, в отличие от обычного на плотных заполнителях, обусловлен тем, что пористые заполнители не оказывают существенного торможения влажностной усадки цементного камня за счет эффекта обжата. В пользу этого положения говорит и ползучесть пористого заполнителя, показанная нами на аглопорите в п. 2.6, тогда как в бетонах на плотных заполнителях ползучесть проявляет лишь цементный камень.

Известно, что на деформативную способность бетона при кратковременном и длительном нагружении существенное влияние оказывают заполнители.

Цискрели Г.Д. [86] полагает, что модуль упругости обычного бетона на плотных заполнителях есть функция прочности и объемного веса бетона.

При равной прочности бетоны на пористых заполнителях имеют вдвое меньший модуль упругости, вдвое большую предельную сжимаемость и растяжимость, а также поперечную деформацию при сжатии, – по сравнению с тяжелыми бетонами, как это показано М.З. Симоновым [5].

Объяснение различной деформативной способности тяжелых и легких бетонов, исходя из различной природы, структуры заполнителей, по-видимому, будет однозначным.

Вероятно, для объяснения этого положения необходимо учитывать, при всех прочих равных условиях, структуру цементного камня, формирование которой, с точки зрения структурных напряжений, будет существенно отличаться в бетонах на плотных и пористых заполнителях.

Анализируя опытные данные о влиянии усадки цементного камня на формирование структуры бетона и его прочности, необходимо отметить некоторую противоречивость во взглядах ряда специалистов по этому вопросу.

Бесспорным признается всеми исследователями возникновение структурных напряжений в бетоне, обусловленных собственно усадкой, которые приводят к разрыхлению структуры бетона и понижению его прочности.

Подтверждением этого положения служат опыты А.В. Саталкина [81], в которых он показал, что при раннем нагружении бетона наблюдается модифицирование структуры цементного камня, выражающееся в измельчении структурных элементов последнего, повышении его однородности и уменьшении внутреннего напряженного состояния. А также опыты последних лет [87, 88] по эффекту повторного вибрирования бетонов, который заключается в снятии начальных напряжений в структуре цементного камня, возникающих в нем в процессе схватывания и твердения.

Как было указано выше, влажностная усадка способствует возникновению новой системы напряжений.

Отсутствие гигрометрического равновесия с окружающей средой приводит к высыханию капиллярно-пористого бетона. Высыхание бетона по объему происходит неравномерно вследствие малости коэффициента диффузии влаги, в результате чего в нем возникают градиенты влажности и усадочные напряжения. Это приводит к возникновению на поверхности бетонного образца растягивающих напряжений, а внутри – сжимающих.

Отрицательное влияние влажностной усадки на структуру бетона проявляется в нем в виде появления усадочных трещин.

Однако, необходимо отметить и противоположную точку зрения ряда исследователей.

В одной из работ Я.В. Столяров [89] отмечал: “Огульное признание усадки бетона вредным явлением, весьма распространенное в технических кругах, следует считать неправильным. В зависимости от характера работы конструкции усадка может оказаться или выгодной, или невыгодной.”

Фрейсине Е. [90] пишет: “Можно считать установленным, что прочность цементов растет с возрастом бетона очень долго. Из сказанного выше следует, что значительная часть увеличения прочности, в настоящий момент не известная, является следствием увеличения со временем усадочного сжатия”.

Васильев Л.И. [91], анализируя экспериментальные данные исследователей, отмечает, что “... нарастание усадки цементного раствора пропорционально логарифму времени. Такому же закону подчиняется нарастание прочности. Это обстоятельство дает основание для изучения вопроса о связи усадки и прочности”.

Мейер и Вальц [92, 93] полагают, что градиентные напряжения, обусловленные неоднородной усадкой, оказывают большое влияние на работу материала: они увеличивают прочность на растяжение.

Анализируя литературные данные по явлению усадка – обжатие в бетоне, следует подчеркнуть, что факт существования обжатия заполнителя в бетоне окружающей его оболочкой цементного камня при усадке последней признается многими исследователями.

Так, Фрайфельд С.Е. [67] отмечает, что “прочность бетона на малопрочном заполнителе значительно увеличивается при увеличении прочности последнего, так как увеличивается не только непосредственная его прочность, но и обжатие усадкой”.

Корнилович Ю.Е. [94] считает, что зерно заполнителя, окруженное оболочкой вяжущего, в случае свободного расширения последнего при твердении приводит к ослаблению контакта между вяжущим и заполнителем и нарушению адгезии, а в случае усадки – наоборот, к усилению контакта и адгезии.

Столяров Я.В. [89] указывает, что из двух факторов, определяющих сцепление арматуры с бетоном, второй представляет “трение стержня в бетоне, возникающее при малейших деформациях стержня под нагрузкой, это трение получается в результате давления, которое оказывает бетон на стержень вследствие происходящей в нем усадки”.

Лермит Р. [95] отмечает, что цементный камень, испытывая усадку, подвергается реактивному воздействию со стороны заполнителя.

Непк Р. [96] показал расчетным путем величину радиальных сжимающих и касательных растягивающих напряжений в оболочке цементного камня, окружающей заполнитель, когда она стремится сжаться.

В работе [97] приводятся опытные данные по измерению сжимающих напряжений от усадки. В бетонную балку, изготовленную из качественного дорожного бетона размером 120×15×15 см, закладывают измерительные инструменты, которые были сделаны так, чтобы они оказывали реологическое действие, равное действию щебня размером 40 мм. Через полгода воздушного хранения при температуре 20 °С и относительной влажности порядка 60 % было измерено сжимающее напряжение около 100 кгс/см<sup>2</sup>. Аналогичный образец, находящийся в воде, показал напряжение, близкое к нулю, когда же его поместили в воздушно-сухие условия, сжимающие напряжения стали возрастать и через несколько месяцев достигли примерно 100 кг/см<sup>2</sup>. Однако в работе отмечается, что со временем сжимающие напряжения стали падать, по-видимому, в результате проявления ползучести бетона.



Опыты [85, 95, 98] и др. по определению трещиностойкости бетонов на кольцевых образцах также базируются на эффекте обжатия стального сердечника окружающим цементным кольцом.

На этом же принципе основан и метод, предложенный Р.Л. Майляном [99]. И, наконец, об этом говорит сама усадка бетонов на различных заполнителях. Многочисленными опытами показано, что при прочих равных условиях, усадка бетона тем больше, чем меньше модуль упругости заполнителей.

Таким образом, обжатие заполнителей в бетоне, на основании приведенного анализа и наших опытных данных, можно считать реальным.

О том, что это обжатие приводит к возникновению системы внутренних напряжений в бетоне, которые складываются с напряжениями от внешних сил, – также нет противоречивых мнений у исследователей.

По этому поводу А.Е. Десов [47] отмечает, что расхождение между теорией и опытом объясняется неучетом влияния внутренних напряжений на деформации и прочность бетона.

В главе 3 было показано обжатие аглопорита и керамзита экспериментальным путем на структурных моделях легкого бетона.

Эти данные позволяют считать доказанной гипотезу “об эффекте предварительного обжатия пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в легком бетоне”.

Влияние обжатия заполнителей в бетоне на его структурообразование и прочность велико, как это видно из сделанного выше обзора.

Однако влияние обжатия заполнителей в тяжелых и легких бетонах имеет качественное различие.

Если в бетонах на плотных заполнителях с высоким модулем упругости, по сравнению с цементным камнем, обжатие приводит к значительным структурным напряжениям и “разрыхлению” структуры цементного камня, что сказывается на понижении прочности бетона и ухудшении адгезии цементного камня с заполнителем (в наших опытах балочка 4x4x16 см, изготовленная на металлическом заполнителе, шариках диаметром 8-10 мм и цементном тесте (В/Ц=0,5), в возрасте 570 дней при хранении на воздухе в лаборатории самопроизвольно разрушилась), то в бетонах на пористых заполнителях, которые имеют невысокий модуль упругости – проявляется эффект обжатия заполнителя за счет его податливости от усилий, развиваемых сжимающейся оболочкой цементного камня. Влияние этого эффекта на формирование структуры и прочности легкого конструктивного бетона велико. Прежде всего, обжатие приводит к сжатию заполнителя, что увеличивает его растяжимость под нагрузкой при работе конструкции.

Во-вторых, за счет податливости заполнителя в окружающем цементном камне развиваются значительно меньше структурные напряжения и, естественно, проявляется в меньшей мере “разрыхление” его структуры, что будет способствовать увеличению прочности бетона на сжатие и особенно на растяжение. В-третьих, обжатие создает лучшие условия срастания заполнителя и цементного раствора при нарушении монолитности последнего. Это происходит за счет возможных упругих деформаций расширения заполнителя при накоплении микротрещин и появлении разрывов в растворной части бетона.

Подтверждением этого положения могут служить общепризнанные данные о повышенной сжимаемости и растяжимости легких бетонов, результаты опытов Ю.С. Корниловича и Ю.Д. Нациевского [8] о превышении предельной деформации расширения опочного щебня, испытанного в бетоне, на одну треть по сравнению с отдельно испытанной опоккой, а также данные В.И. Осидзе [100], в которых он показал, что растяжимость бетона на известняковом щебне на 70-90 % выше, чем на щебне из песчаника.

По-видимому, необходимо отметить и то обстоятельство, что в зависимости от оптимального соотношения деформаций обжатия заполнителя и возникающих при этом структурных напряжений в цементном камне это явление будет сказываться или положительно, или отрицательно на структурообразование и прочность бетона.

Логично предположить, что повышение прочности легкого бетона путем дальнейшего повышения прочности пористого заполнителя будет ограничиваться интенсивным ростом структурных напряжений и сопутствующими явлениями, о которых было скачано выше. Такова суть и диалектическая противоречивость указанных явлений.

И в заключение укажем, что на эффект обжатия искусственных пористых заполнителей значительное влияние оказывают деформативные особенности последних при увлажнении и высушивании. В главе 3 было показано, что эффект предварительного обжатия пористого заполнителя теряется в результате появления микротрещин в оболочке цементного камня. Исходя из этого положения и вышеприведенного обзора, мы рассматриваем в данной главе явление обжатия заполнителя в бетоне и технологические факторы и приемы, способствующие его проявлению.

## 4.2. Влияние влажностного состояния заполнителей на формирование структуры и прочности легкого бетона с учетом эффекта обжатия

Как отмечалось выше, в настоящее время еще не сложилось единое мнение о том, в каком состоянии, а, именно, в сухом или влажном, следует вводить пористый заполнитель в бетонную смесь.

В исследованиях, посвященных этому вопросу, формирование структуры и прочности легкого бетона, как правило, рассматривалось с учетом эффекта самовакуумирования.

При этом влажностные деформации заполнителей, обусловленные их начальным водосодержанием и миграцией влаги в бетонной смеси, в процессе образования структуры бетона не принимались во внимание.

Как было показано в главе 2, усадка и расширение искусственных пористых заполнителей при изменении их влажности колеблются в широких пределах. Изменение составляет величину порядка усадки и расширения цементного камня и даже превосходит их.

В связи с этим нет никаких оснований не учитывать эти деформативные особенности искусственных заполнителей в процессе формирования структуры бетона.

Исследования авторов о влиянии влажностного состояния пористого заполнителя на формирование структуры и прочности легкого бетона, с учетом сохранения эффекта предварительного обжатия заполнителя, проведены на этой новой методологической основе.

Эти исследования в граничащих между собой областях физико-механических свойств бетона и свойств бетонной смеси, обусловленных различным влажностным состоянием заполнителя, дают представления о влажностных деформациях конгломерата и миграции влаги в процессе твердения и формирования структуры бетона.

В этой связи нами были проведены опыты над образцами из керамзитобетона, твердевшим в лабораторных условиях при относительной влажности воздуха 75-80 % и температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Бетон изготовляли на основе портландцемента марки 400 Вольского цементного завода "Большевик", Куйбышевского керамзита марки 700, в качестве мелкого заполнителя использовали сурский речной песок с модулем крупности 1,3.

Для определения предела прочности на растяжение посредством раскалывания образцов и предела прочности на сжатие были изготовлены кубики размером  $10 \times 10 \times 10$  см на фракции керамзита 10-20 мм, с коэффициентом насыщения  $r' = 0,4$ .

Для определения влажностных деформаций керамзитобетона изготовляли призмочки размером  $4 \times 4 \times 16$  см на керамзите фракции

5-10 мм, с коэффициентом насыщения  $r'=0,6$ . Коэффициент насыщения  $r'=0,6$  был принят максимальным с целью более четкого проявления зависимости: влажностное состояние заполнителя – деформации бетона.

Расход материала на 1 м<sup>3</sup> бетона приведен в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

№ п/п	Наименование материалов	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона	
		при изготовлении кубиков	при изготовлении призм
1.	Цемент	450	400
2.	Песок	820	535
3.	Керамзит	468	700
4.	Вода	210 л	200 л

В зависимости от влажностного состояния керамзита, при введении его в бетонную смесь, было изготовлено 7 серий керамзитобетона.

Ниже приведены сведения о состоянии керамзита перед приготовлением бетонной смеси по сериям.

Серия КС – керамзит в воздушно-сухом состоянии.

Серия К-12 – керамзит после 12 часов насыщения в воде (весовое водопоглощение фракции 10-20 мм – 13,2 %, фракции 5-10 мм – 16,8%).

Серия К-24 – керамзит после 24 часов насыщения в воде (весовое водопоглощение по фракциям, соответственно, 13,9 % и 17,5 %).

Серия К-48 – керамзит после 48 часов насыщения в воде (весовое водопоглощение по фракциям, соответственно, 16,8 % и 20,8 %).

Серия К-2 – керамзит после 24 часов насыщения в воде 12 часов находился на воздухе (весовое водопоглощение по фракциям, соответственно, 10,6 % и 5,3 %).

Серия ПНС – керамзит в сухом состоянии после 3-х циклов попеременного насыщения в воде в течение одних суток и высушивания в сушильном шкафу при температуре 105 °С.

Серия ПНВ – керамзит после 3-х циклов увлажнения и высушивания по серии ПНС, насыщался в воде 6 часов (весовое водопоглощение фракции 10-20 мм – 10,8 %, фракции 5-10 мм – 13,0 %).

Общий расход воды при изготовлении керамзитобетона (вода затворения и вода насыщения керамзита) во всех сериях был одинаков. От этого жесткость бетонной смеси каждой серии была различной и составляла соответственно: КС-20 с, К-12 и К-24 – 60 с, К-48 – 90 с, К-2 – 1 – 60 с, ПНС-20 с, ПНВ – 45 с.

Одинаковый расход воды по сериям был обусловлен спецификой пористого заполнителя, которая заключается в том, что в начальные сроки керамзит интенсивно отсасывает воду из бетонной смеси, а затем в процессе твердения отдает её в цементный камень. Указанная кинетика водообмена контролировалась в наших опытах.

Приготовление бетонной смеси – ручное. Формование бетона на стандартной лабораторной виброплощадке с частотой 2950 колебаний в минуту и с амплитудой колебаний под нагрузкой 0,45 мм с использованием пригруза 40 г/см<sup>2</sup>. После суточного выдерживания образцов в металлических формах под влажной тканью, их распалубливали и помещали в воздушные условия хранения в лаборатории.

Испытания образцов были проведены в сроки, обусловленные экспериментом. Результаты испытаний приведены в табл. 10.

Как видно из данных, приведенных в табл. 10, формирование структуры и прочности керамзитобетона в зависимости от влажностного состояния заполнителя имеет существенное различие.

Прежде всего, рассмотрим усадку бетона, которая фиксировалась с помощью компаратора ИЗА-2. Наибольшие деформации усадки, а, следовательно, и обжатия, так как коэффициент насыщения заполнителем  $r'$  был принят максимальным, показали образцы серии КС. На образцах серий К-12 и К-24 отмечалось изменение характера усадки и уменьшение её относительной величины. Образцы серии К-48 показали более интенсивную усадку в начальные сроки, но в возрасте 28 суток она была несколько меньше, чем у образцов серии КС.

Различный характер и относительную величину усадки образцов указанных серий можно объяснить, если исходить из представлений о деформативных особенностях искусственных пористых заполнителей при увлажнении и высушивании, эта особенность деформаций и нашего понимания сущности формирования структуры легкого бетона – была показана в главе 2.

Исходя из полученных данных, по-видимому, можно полагать следующее. При введении керамзита в бетонную смесь в сухом состоянии он поглощает в себя определенное количество воды (серия КС). Эта вода насыщения будет способствовать возникновению деформаций набухания керамзита, однако следует отметить, что набухание керамзита возникает не мгновенно, а отстает на некоторый промежуток времени от кинетики водопоглощения. В дальнейшем, в результате твердения цементного камня, начинается обратная миграция влаги, что будет показано ниже. В этих условиях проявление набухания керамзита будет незначительным, если учесть при этом возникающую усадку цементного камня.

Таблица 10

Изменение определяемых характеристик керамзитобетона в процессе образования его структуры

Наименование определяемых характеристик	Шифр серии													
	КС		К-12		К-24		К-48		К-2 – 1		ПНС		ПНВ	
	возраст в сут.		возраст в сут.		возраст в сут.		возраст в сут.		возраст в сут.		возраст в сут.		возраст в сут.	
	3	28	3	28	3	28	3	28	3	28	3	28	3	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Прочность на сжатие, кгс/см <sup>2</sup>	177	350	219	309	217	310	179	316	187	312	220	307	182	291
Прочность на растяжение, кгс/см <sup>2</sup>	15,2	21,3	16,9	21,2	17,2	20,1	15,2	23,4	15,8	19,9	13,8	23,0	16,1	18,9
Влажность цементного камня, %	10,3	7,4	8,0	7,6	8,1	7,5	8,0	6,7	8,0	6,3	11,0	7,5	10,0	7,9
Влажность керамзита, %	4.3	1.5	4.9	1.9	5.0	2.0	4.3	3.5	4.0	1.5	4.2	2.5	4.8	2.0
Усадка, мм/м, в возрасте, сут.														
1	-0.08		-0.08		0.00		-0.15		-0.07		-0.20		+0.10	
3	-0.13		-0.24		-0.10		-0.4		-0.20		-0.24		-0.04	
7	-0.34		-0.32		-0.30		-0.35		-0.30		-0.29		-0.20	
14	-0.39		-0.40		-0.34		-0.44		-0.34		-0.39		-0.24	
28	-0.53		-0.46		-0.39		-0.50		-0.48		-0.41		-0.25	

Наиболее существенным фактом является то, что равновесный баланс влаги в керамзите устанавливается довольно быстро. Уже через 3 суток во всех сериях образцов, несмотря на резко различную первоначальную влажность гранул керамзита, их водосодержание практически одинаково и находится в пределах 4,0-5,0 %.

Нельзя забывать, что это обусловлено, прежде всего, условиями опыта, поскольку суммарное количество воды затворения и насыщения гранул было во всех образцах одинаковым. Но следует при этом учитывать и то, что высокая стабильность влагопереноса зависит от взаимодействия пористых структур керамзита и цементного камня.

В начальный период времени направление переноса влаги может быть различным, в зависимости от влагосодержания керамзита, но уже после первых трех суток оно приобретает направленный характер от зерна к цементному камню. Следовательно, разница в проявляемых деформациях собственно заполнителя может быть обнаружена только в ранние сроки твердения, что подтверждается разной величиной усадки бетонных образцов через 1 и 3 суток. Далее величина усадки всех партий, за исключением ПНВ, одного порядка. Существенно отличаются образцы ПНВ, подвергнутые попеременному насыщению и высушиванию с последующим насыщением в течение 6 час. перед приготовлением бетонной смеси. Образцы этой серии показали наименьшую прочность при сжатии и растяжении.

Во второй главе было показано, что после первого цикла переменного насыщения и высушивания искусственные пористые заполнители (керамзит и аглопорит) в последующих циклах проявляют деформации сжатия при насыщении и деформации расширения при высушивании – рис. 9-11. Эти опытные данные, полученные на отдельно взятых заполнителях, подтверждаются результатами усадки бетона, что в свою очередь подтверждает реальность взглядов о взаимном влиянии составных частей (заполнитель – раствор) легкого бетона на его структурообразование.

Так керамзит, в сухом состоянии введенный в бетонную смесь серии ПНС, поглощает часть воды из последней, при этом в нем развиваются деформации сжатия, что находит свое отражение в кинетике усадки бетона.

Напротив, керамзит в серии ПНВ через некоторый промежуток времени начинает отдавать воду в цементный камень, т.е. высыхает, что вызывает его деформации расширения, в результате чего бетон в возрасте 1 суток показал даже набухание, величина которого составляла 0,1 мм/м. Дальнейшая кинетика и конечная относительная

величина усадки-обжатия в возрасте 28 дней образцов серии ПНВ имеют существенное различие по сравнению с образцами других серий.

Анализируя полученные в опытах прочностные характеристики керамзитобетона, следует отметить, что наибольшая прочность на сжатие, в возрасте 28 суток, была получена на образцах серии КС и составляла 350 кгс/см<sup>2</sup>. По другим сериям этот показатель оказался меньше на 11-20 %. Образцы серии К-12 и К-24 показали повышенную прочность в возрасте трех суток, по-видимому, это можно объяснить влиянием воды затворения. Однако это преимущество в процессе дальнейшего формирования структуры бетона терялось, что обуславливало его пониженную прочность в возрасте 28 суток.

Повышенную прочность на растяжение образцов серии К-48 и ПНС в 28 суточном возрасте, вероятно, можно объяснить повышенным влагосодержанием керамзита этих серий. Это согласуется с показателем коэффициента размягчения керамзита, показанным выше. Пониженную прочность на растяжение образцов серии ПНВ следует понимать как снижение эффекта предварительного обжатия пористого заполнителя в процессе твердения бетона, что обусловлено характером его усадки.

На рис. 35-46 показан характер разрушения образцов указанных серий при растяжении, испытанных методом раскалывания в возрасте трех и 28 суток.

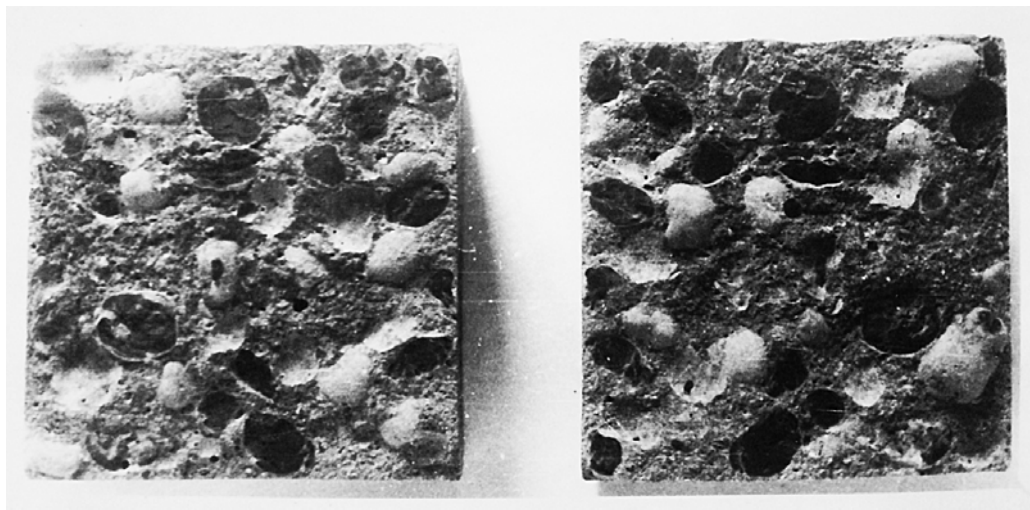


Рис. 35. Характер разрушения образцов серии КС при раскалывании в возрасте трех суток



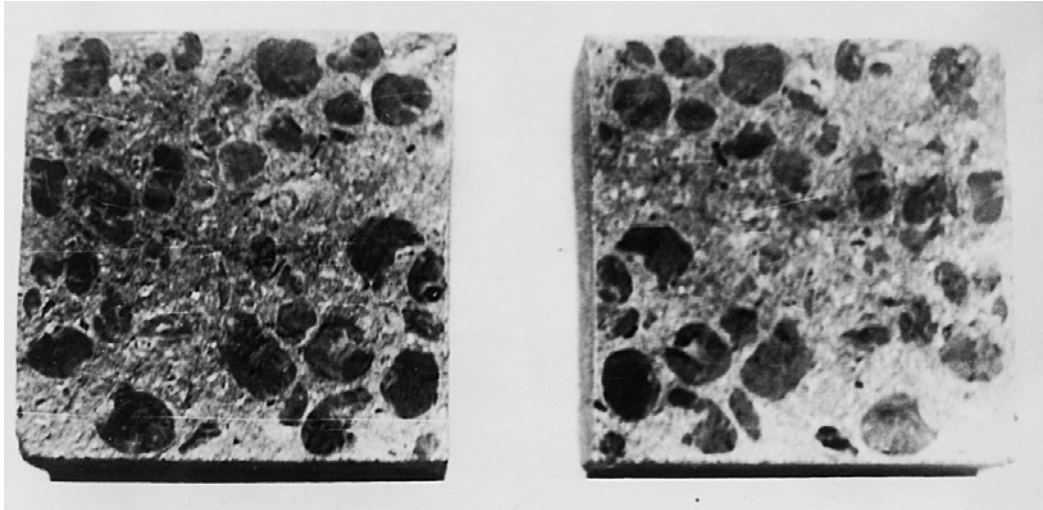


Рис. 36. Характер разрушения образцов серии КС при раскалывании в возрасте 28 суток

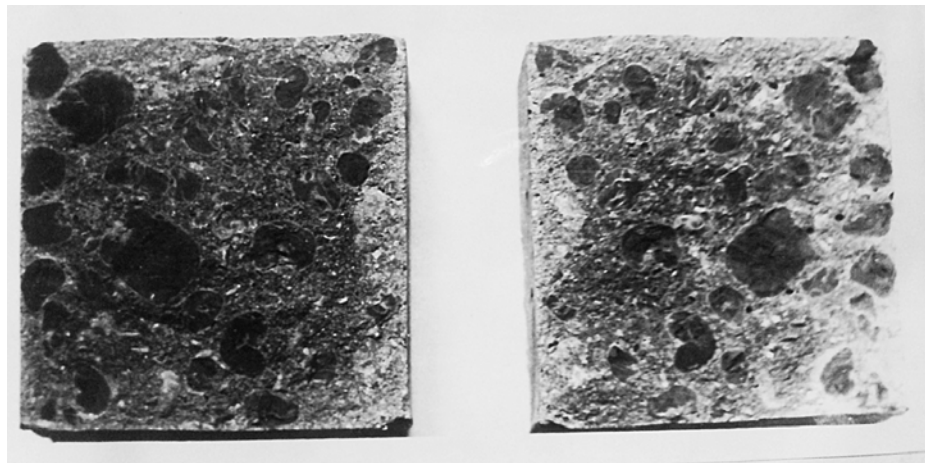


Рис. 37. Характер разрушения образцов серии К-12 при раскалывании в возрасте 28 суток

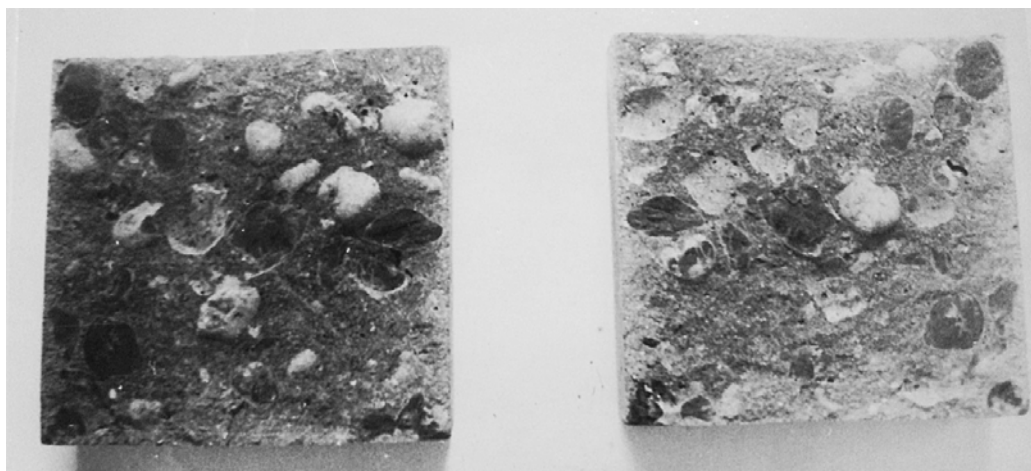


Рис. 38. Характер разрушения образцов серии К-24 при раскалывании в возрасте 3 суток

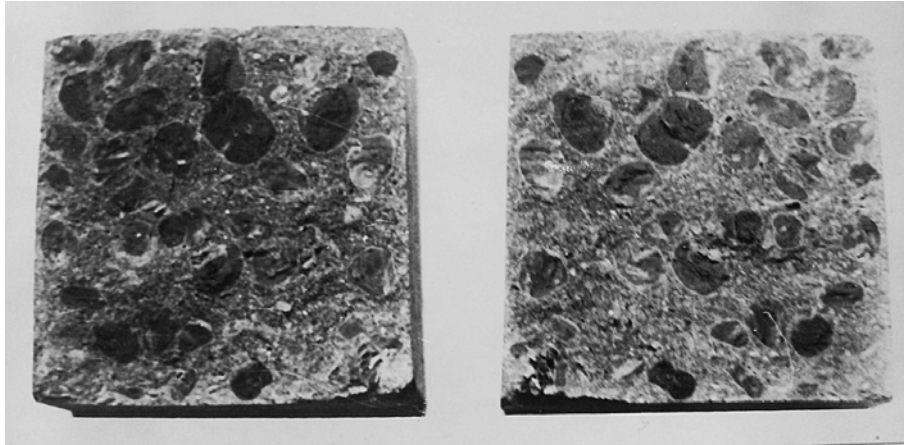


Рис. 39. Характер разрушения образцов серии К-24 при раскалывании в возрасте 28 суток

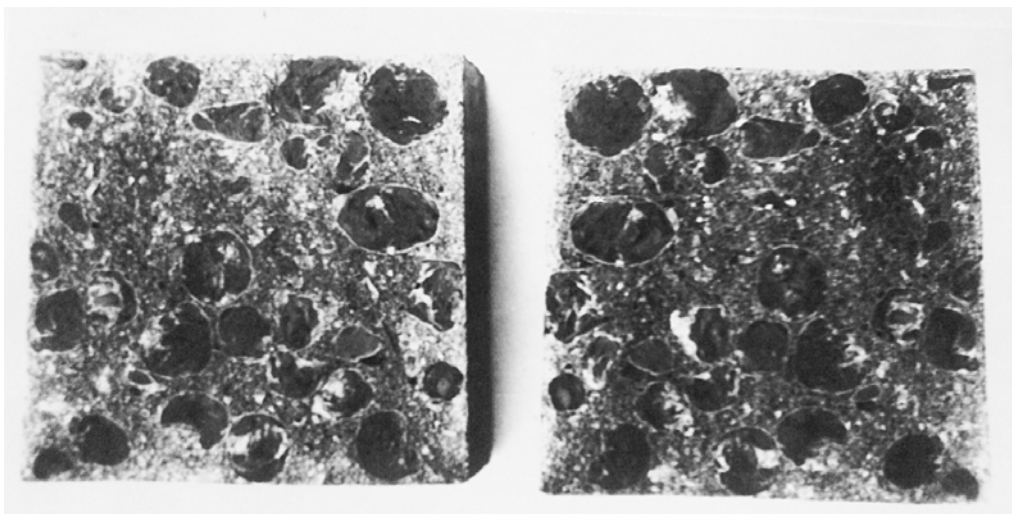


Рис. 40. Характер разрушения образцов серии К-48 при раскалывании в возрасте 28 суток

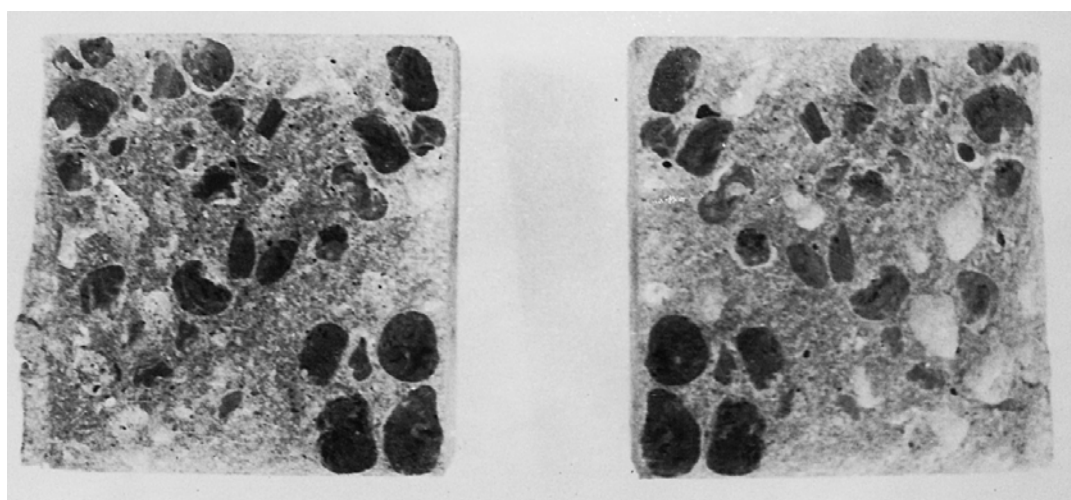


Рис. 41. Характер разрушения образцов серии К-2-1 при раскалывании в возрасте 3 суток

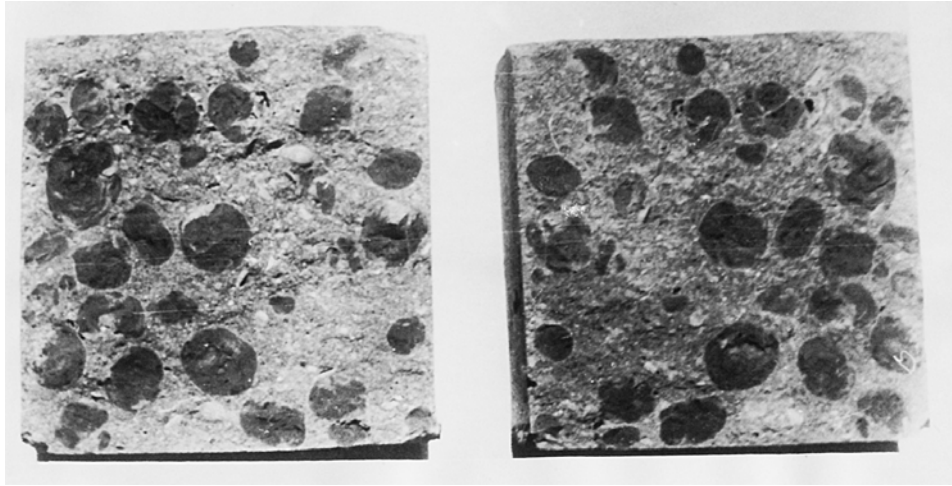


Рис. 42. Характер разрушения образцов серии К-2-1 при раскалывании в возрасте 28 суток

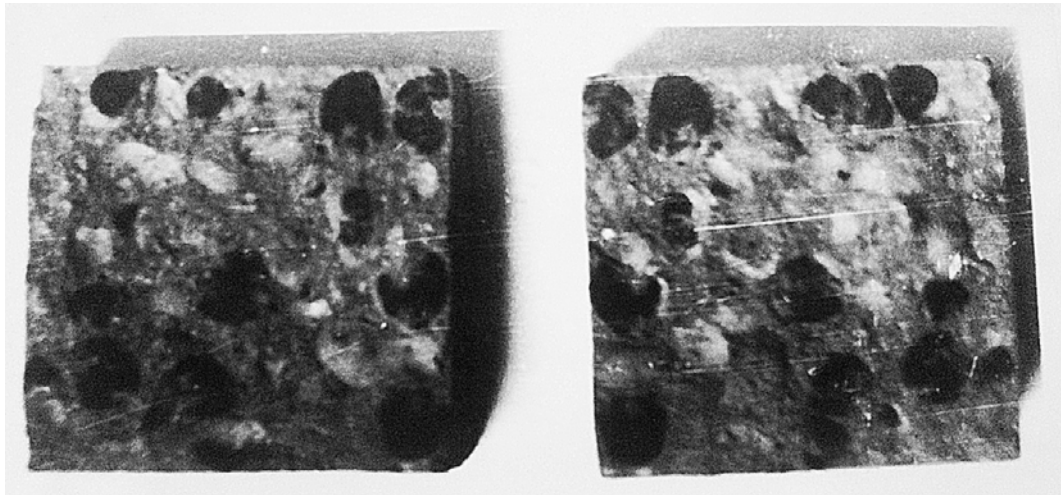


Рис. 43. Характер разрушения образцов серии ПНС при раскалывании в возрасте 3 суток

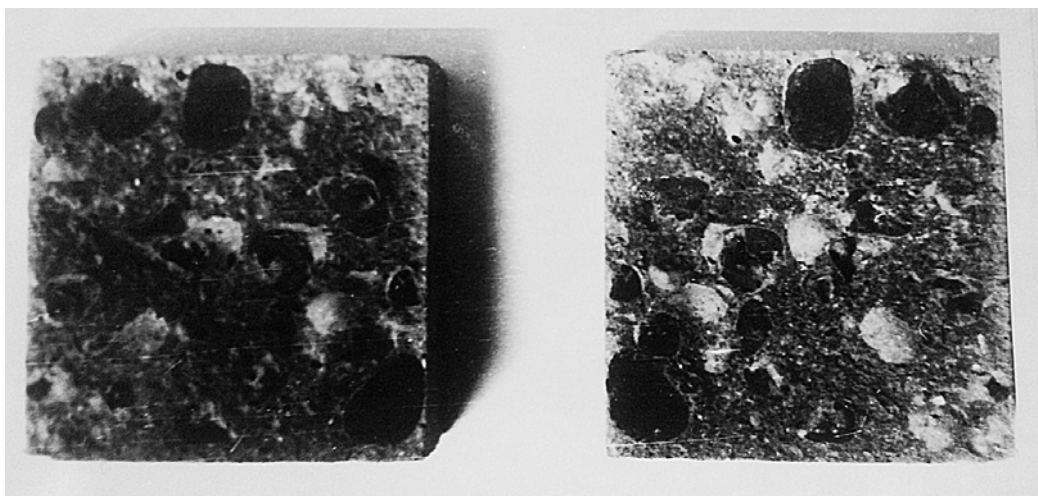


Рис. 44. Характер разрушения образцов серии ПНВ при раскалывании в возрасте 3 суток

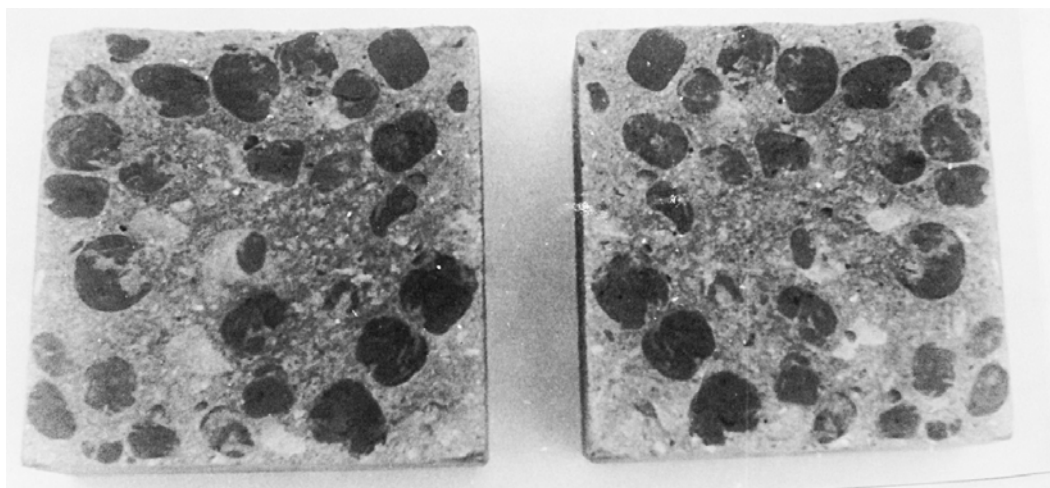


Рис. 45. Характер разрушения образцов серии ПНС при раскалывании в возрасте 28 суток

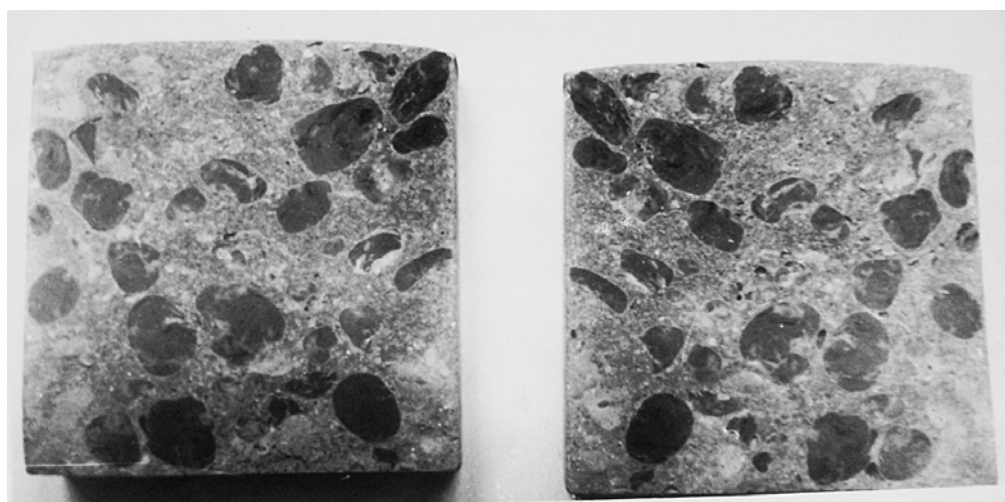


Рис. 46. Характер разрушения образцов серии ПНВ при раскалывании в возрасте 28 суток

Сравнивая поверхности разрушения, например, серий ПНС, ПНВ и К-48 в возрасте 28 суток, можно отметить, что во всех случаях разрушение идет по заполнителю. Однако в данных сериях заполнитель получил различную деформацию обжатия, что будет сказываться на его предельной растяжимости, а, следовательно, и на пределе прочности при растяжении бетона.

Исходя из вышесказанного и опытных данных, необходимо отметить, что формирование структуры и прочности легких бетонов на пористых заполнителях, имеющих начальное напряженное состояние, следует рассматривать не только с учетом эффекта самовакуумирования (Симонов М.З.), но и с учетом особенностей их влажностных деформаций при миграции влаги в бетоне, которая обуславливает эффект предварительного обжатия пористого заполнителя.

На основании проведенных исследований, по-видимому, можно полагать, что искусственные пористые заполнители наиболее полно проявляют свои потенциальные возможности в формировании структуры и прочности бетона тогда, когда они вводятся в бетонную смесь в сухом состоянии.

#### 4.3. Влияние повторного вибрирования на проявление эффекта обжатия заполнителя в легком бетоне

Исследованиями ряда отечественных и зарубежных ученых установлена высокая эффективность использования повторного вибрирования в целях повышения прочностных характеристик бетона [87, 88, 101].

Однако, механизм влияния повторного вибрирования на твердеющий бетон рядом авторов объясняется по-разному.

Одни считают, что улучшение физико-механических свойств бетона достигается в результате увеличения плотности цементного камня в процессе образования его структуры.

Другие полагают, что повторное вибрирование способствует устранению внутренних напряжений в цементном камне, обусловленных его усадкой в процессе схватывания.

Противопоставление указанных взглядов друг другу [101], по-видимому, является неоправданным, так как увеличение плотности коагуляционной структуры цементного теста в результате перераспределения воды является бесспорным [87].

На наш взгляд, повторное вибрирование бетонов оказывает значительное влияние на проявление как первого, так и второго фактора.

В легких бетонах на пористых заполнителях на эти два фактора будет накладываться еще один, а именно, диффузионный процесс перераспределения воды в бетонной смеси между цементным тестом и заполнителем.

Нами было исследовано влияние промежутков времени, в течение которых производилось повторное вибрирование, на формирование структуры и прочности легкого бетона, а также на проявление эффекта предварительного обжатия пористого заполнителя.

Опыты были проведены на образцах из керамзитобетона. Для этого были изготовлены кубики размером 10×10×10 см, на фракции керамзита 10-20 мм, для определения предела прочности на растяжение и на

сжатие, а также призмочки размером 4×4×16 см для определения влажностной усадки.

Применяемые в исследованиях материалы и их расход на 1 м<sup>3</sup> бетона при изготовлении образцов кубиков и призм указаны в табл. 9. Образцы керамзитобетона изготавливались на сухом заполнителе.

В зависимости от сроков повторного вибрирования было изготовлено три серии образцов бетона.

Серия КВ-3. Образцы бетона этой серии подвергались повторному вибрированию в промежутке между концом формования и концом схватывания. Было проведено 10 повторных вибрирований.

Серия КВ-4. Повторное вибрирование проводили в промежутке между началом схватывания и концом схватывания. Было проведено 4 повторных вибраций.

Серия КВ-5. Повторное вибрирование в промежутке между концом формования и началом схватывания, т.е. было проведено 7 повторных вибраций.

Необходимо отметить некоторую условность принятых сроков повторного вибрирования, так как сроки схватывания цемента в бетоне будут отличаться от этих характеристик цемента, определяемых по ГОСТ. Однако ввиду тиксотропного разжижения, которое продлевает жизнеспособность цементного теста и водообмена между компонентами легкого бетона, эта ошибка, по-видимому, будет незначительна.

Уплотнение бетона при укладке осуществлялась на стандартной виброплощадке с частотой 2950 кол./мин и амплитудой 0,45 мм в течение 20 с с использованием пригруза 40 г/см<sup>2</sup>. Повторное вибрирование производили без пригруза в течение 1 мин. через каждые 30 мин.

После этого образцы накрывали влажной тканью и хранили в формах в течение 24 часов, а затем после освобождения от форм – в лаборатории при относительной влажности воздуха 80 % и температуре (20 ± 2) °С.

Испытывали образцы-кубы в возрасте 3 и 28 суток. Деформации усадки образцов – призм фиксировались в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Результаты испытаний показаны на рис. 47-49.

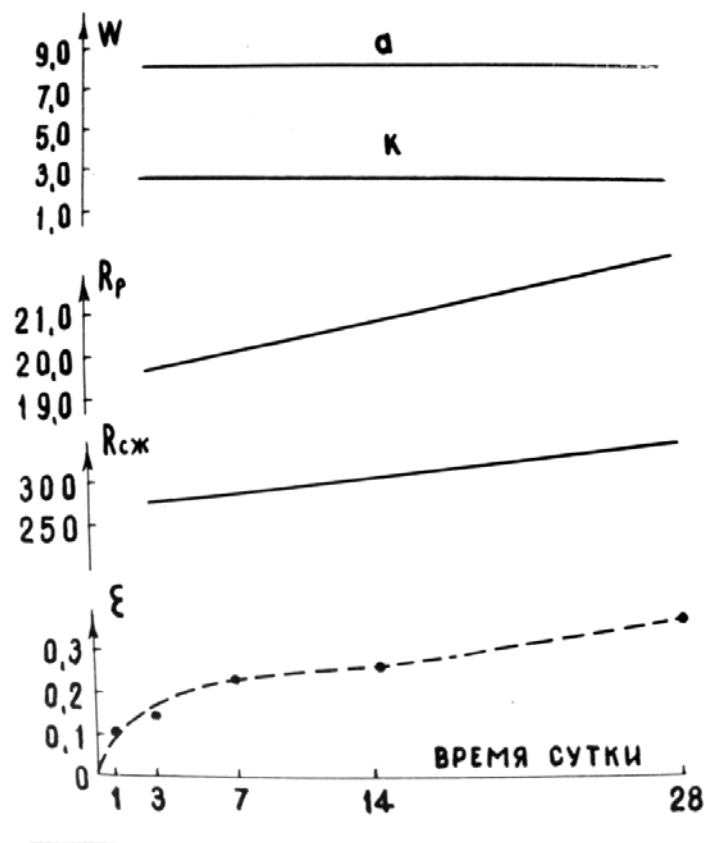


Рис. 47. Усадка –  $\epsilon$ , прочность на сжатие –  $R_{сж}$  и растяжение –  $R_p$ ; влажность цементного камня –  $W_a$  и керамзита –  $W_k$  образцов серии КВ-3

Из рассмотрения полученных данных можно прийти к следующим выводам: повторное вибрирование существенно повышает прочность образцов на сжатие в начальные сроки твердения (в возрасте 3 суток) и прочность керамзитобетона на растяжение в возрасте 28 суток.

Наибольший прирост прочности на растяжение показали образцы серии КВ-5, для которых повторное вибрирование проводили в промежутке между концом формования и началом схватывания. На образцах серий КВ-3 и КВ-4 отмечалось понижение прочностных характеристик.

Для объяснения полученных результатов, вероятно, надо исходить из представлений о миграции влаги в твердеющем бетоне, обусловленной повторным вибрированием.

Как известно, при вибрационном воздействии на цементное тесто достигается увеличение дисперсности твердой фазы, что вызывает перераспределение воды затворения и повышение однородности структуры материала [87], а также приводит к уменьшению внутренних напряжений и дефектов в нем [102]. В легковесной смеси на процесс

перераспределения воды будет оказывать влияние пористый заполнитель.

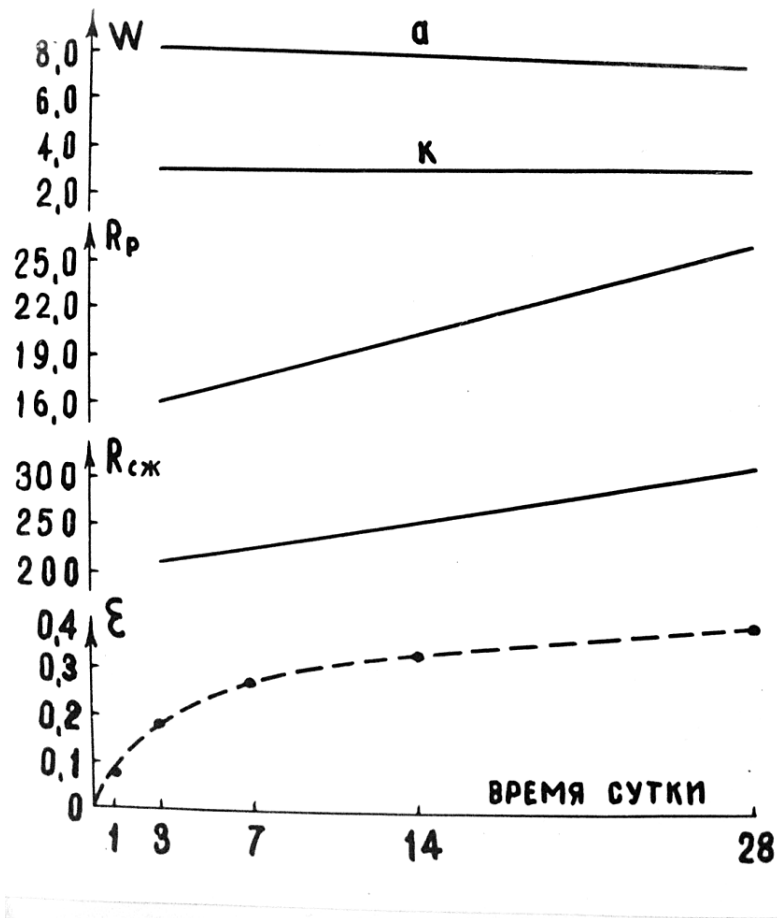


Рис. 48. Усадка –  $\epsilon$ , прочность на сжатие –  $R_{сж}$  и растяжение –  $R_p$ ; влажность цементного камня –  $W_a$  и керамзита –  $W_k$  образцов серии КВ-4

Если принять во внимание, что последний при вибрационном воздействии наиболее интенсивно вакуумирует бетонную смесь, то станет очевидным его существенное влияние на процесс миграции влаги и на сроки возникновения коагуляционных и кристаллизационных связей в структуре цементного камня.

В исследованиях ряда авторов было показано, что самовакумирование приводит к увеличению плотности раствора в слое, прилегающем к поверхности заполнителя. Однако, это уплотнение раствора на поверхности зерна должно обуславливать его разрыхление в межзерновом пространстве [103].



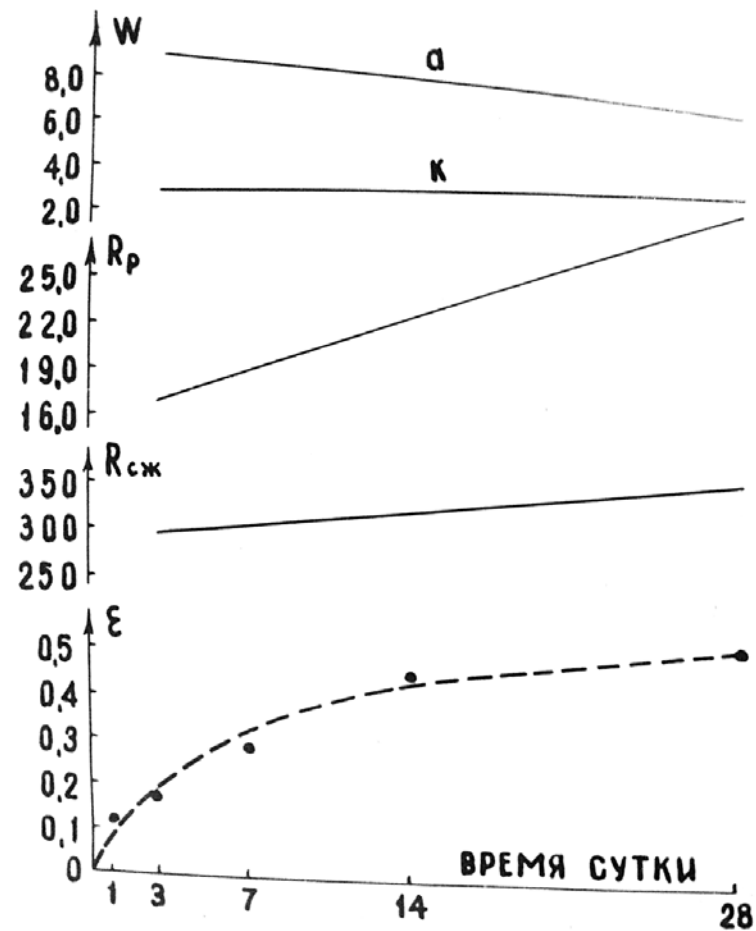


Рис. 49. Усадка –  $\epsilon$ , прочность на сжатие –  $R_{сж}$  и растяжение –  $R_p$ ; влажность цементного камня –  $W_a$  и керамзита –  $W_k$  образцов серии КВ-5

Повторная вибрация легкобетонной смеси, по-видимому, будет способствовать гомогенизации плотности раствора в межзерновом пространстве за счет перераспределения воды.

Исходя из этих положений, полученные результаты можно объяснить следующим образом. Повторная вибрация в промежутке от конца формования до начала схватывания способствует оптимальному перераспределению воды в легкобетонной смеси, уплотнению структуры цементного камня при нарушении коагуляционных связей, которые способны тиксотропно восстановиться.

Дальнейшее вибрационное воздействие на образцы по серии КВ-3 приводит к дополнительной посылке части воды из заполнителя в цементный камень, что будет облегчать нарушение уже не только коагуляционных, но и кристаллических связей. В результате чего в структуре цементного камня будут возникать дефекты, обуславливающие понижение ее прочности.

Влияние режима вибрационного воздействия в промежутке между началом схватывания и концом схватывания, образцы серии КВ-4, вероятно, следует понимать так.

Самовакуумирование бетонной смеси до момента начала схватывания цемента в образцах этой серии будет проходить менее интенсивно, следовательно, гидратация и твердение цемента будут характеризоваться замедленным процессом. Повторное вибрирование в этих условиях будет меньше нарушать кристаллизационные связи, что должно в меньшей степени отразиться на прочностных показателях бетона.

В подтверждение изложенного можно привести данные опытов по изменению весового водосодержания керамзита в образцах бетона в зависимости от режима повторной вибрации. Как видно из рис. 47-49, оно уменьшалось от образцов серии КВ-5 к серии КВ-3 в возрасте бетона 28 суток.

Сопоставляя усадку и прочностные характеристики бетона, необходимо отметить, что образцы серии КВ-5 показали наибольшую величину влажностной деформации усадки, которая незначительно отличалась от подобной характеристики образцов контрольной серии КС.

Образцы серий КВ-3 и КВ-4 показали меньшую деформацию усадки-обжатия, в то же время они характеризовались меньшей прочностью на растяжение.

Наряду с вышеуказанными факторами, эти данные говорят о тесной связи между деформациями обжатия пористого заполнителя и прочностью бетона на растяжение.

В заключение необходимо отметить, что прочность на сжатие повторно вибрированных образцов в наших опытах не отличалась от эталонных в возрасте 28 суток. В 3-х суточном возрасте она превышала контрольную на 20-66 %.

Напротив, прочность на растяжение незначительно различалась в 3-х суточном возрасте бетона, тогда как в возрасте бетона 28 суток повторно вибрированные образцы серий КВ-4 и КВ-5 показали прочность на растяжение выше контрольных на 17 и 33 %, соответственно.

Таким образом, повторное вибрирование легких бетонов проводить полезно, так как этот прием позволяет повысить прочностные характеристики бетона в начальные сроки его твердения, что особенно важно с точки зрения предотвращения возникновения микротрещин в цементном камне и, как следствие этого, сохранения и наиболее оптимального проявления эффекта обжатия пористого заполнителя.

Однако сроки повторных вибрационных воздействий должны увязываться с кинетикой водопоглощения пористых заполнителей,

которая, как известно, существенно зависит от характера пористости последнего.

#### 4.4. Влияние добавки хлористого кальция на проявление эффекта обжатия

Как известно, добавка хлористого кальция оказывает двойное действие на бетон в процессе его твердения.

Во-первых, она позволяет существенно ускорить нарастание прочности бетонов в начальные сроки. Особенно эффективно применение этой добавки, как и других солей этого типа, для медленно твердеющих цементов в обычных условиях, например, для шлаковых и пуццолановых портландцементов. Однако эффективность добавки значительно падает с увеличением активности цемента [104].

Во-вторых, добавка хлористого кальция, в небольших количествах, сильно влияет на деформации усадки бетона.

Учитывая, что при гидротермальной обработке бетона проявление первого фактора добавки существенно уменьшается, а действие второго – сохраняется, логично было предположить, что этим приемом мы можем повысить величину предварительного обжатия пористого заполнителя. В результате этого и прочностные характеристики легкого бетона должны возрасти.

Исходя из этих предположений, были проведены опыты над образцами из аглопоритобетона. Образцы бетона первой серии были изготовлены с 3 % добавкой хлористого кальция. Контрольные образцы – без добавки. Бетон изготовляли на основе портландцемента марки 400 вольского цементного завода и черепановского аглопорита. Для определения прочностных характеристик были изготовлены кубики размером 10×10×10 см на фракции аглопорита 10-20 мм. Призмочки размером 4×4×16 см, на которых определялась усадка, изготовлялись на фракции аглопорита 5-10 мм.

Расход материалов, в кг/м<sup>3</sup>, приведен в табл. 11.

Т а б л и ц а 11

Наименование материалов	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона	
	При изготовлении кубиков	При изготовлении призм
1. Цемент	450	450
2. Песок	730	730
3. Аглопорит	455	460
4. Вода	220 л	220 л

Коэффициент насыщения заполнителем  $r'$  для образцов кубиков и призм был принят равным 0,4.

При формировании образцы уплотнялись на стандартной виброплощадке с использованием пригруза 40 г/см<sup>2</sup>.

После 2-х часов предварительной выдержки образцы подвергались гидротермальной обработке по режиму 2,5+10+естественное остывание при температуре изотермии 80°С. После освобождения от форм образцы хранились в помещении с относительной влажностью воздуха 75-80 %.

Бетонные кубики были испытаны через 10 часов после тепловой обработки, а также в возрасте 28 суток. Усадка определялась в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Результаты испытаний показаны на рис. 50. Из рассмотрения полученных данных рис. 50 можно прийти к следующим выводам.

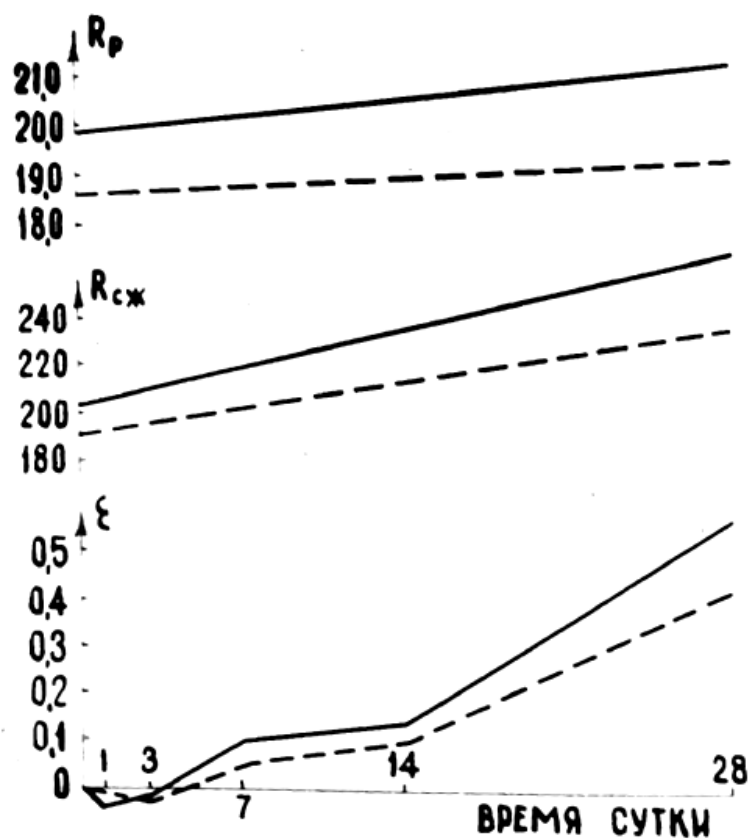


Рис. 50. Усадка –  $\epsilon$ , прочность на сжатие –  $R_{сж}$  и растяжение –  $R_p$  образцов аглопоритобетона:  
 ————— бетон с 3 % добавкой хлористого кальция;  
 - - - - - бетон без добавки

Как мы и предполагали, добавка хлористого кальция, увеличивая эффект обжата заполнителя, способствует повышению прочностных характеристик легкого бетона, причем с возрастом бетона относительный эффект обжата не уменьшается, а, напротив, проявляет тенденцию к росту.

Так, прочность аглопоритобетона на сжатие и растяжение с 3 % добавкой хлористого кальция через 10 часов после пропаривания превышала указанные характеристики контрольных образцов, соответственно, на 6,3 и 7,0 %, а в возрасте 28 суток – на 14,0 и 10,8 %. В то же время усадка этих образцов превышала усадку контрольных в возрасте 28 суток – на 36 %.

Таким образом, эти экспериментальные данные подтверждают гипотезу об эффекте предварительного обжата пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в легком бетоне

#### **4.5. Влияние последовательности загрузки материалов на физико-механические свойства аглопоритобетона и на проявление эффекта обжата заполнителя**

Приготовление однородной легкобетонной смеси, с равномерно распределенными в ней компонентами, зависит от многих факторов – качества сырья, точности дозировки исходных материалов, способов и срока перемешивания, последовательности загрузки и типа смесительной машины [105].

В технологии получения легких конструктивных бетонов нет общепринятых правил в вопросе о последовательности введения.

Нами было исследовано влияние этого фактора на формирование структуры и прочностных характеристик аглопоритобетона.

Бетон изготовляли на основе портландцемента марки 500 Вольского цементного завода “Большевик”, Черепановского аглопорита и Сурского песка.

Были изготовлены кубики в количестве 45 шт. размером 10×10×10 см, на фракции аглопорита 10-20 мм, для определения предела прочности на растяжение и на сжатие, а также призмочки – 18 штук размером 4×4×16 см и 5×5×32 см на фракции 5-10 мм, соответственно, для определения усадки, динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения.

Расход материалов, в кг/м<sup>3</sup>, указан в табл.12.

Т а б л и ц а 12

Наименование материалов	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона	
	При изготовлении кубиков	При изготовлении призм
1. Цемент	460	450
2. Песок	740	715
3. Аглопорит	430	468
4. Вода	250 л	250 л

В зависимости от последовательности загрузки материалов бетонные смеси готовили тремя способами (серия А, Б, В).

Серия А. Вначале перемешивали аглопорит и мелкий заполнитель в сухом состоянии, затем вводили воду затворения и смешивали еще 1 минуту и после этого добавляли цемент. Бетонная смесь с цементом интенсивно перемешивалась в течение 3-4 минут.

Серия Б. Сначала смешивали все сухие компоненты, затем вводили воду затворения и перемешивали в течение 3-4 минут.

Серия В. Сначала приготавливали раствор со всей водой затворения, перемешивали 1,5 мин., затем вводили аглопорит и перемешивали еще 3-4 минуты.

Приготовление бетонных смесей ручное. Образцы уплотнялись вибрированием на стандартной виброплощадке с пригрузом 25 г/см<sup>2</sup>. Продолжительность вибрирования кубиков и призмочек, соответственно, 60 и 30 с.

После 3-х часов предварительной выдержки образцы подвергались гидротермальной обработке по режиму 3+6+естественное остывание при температуре изотермии 80 °С, а затем после распалубки хранились в помещении с относительной влажностью воздуха 60-65 %.

Бетонные кубики и призмочки испытывали в обусловленные экспериментом сроки. Прочность бетона при растяжении методом раскалывания определялась по формуле

$$R_p = \frac{2P}{\pi a^2}. \quad (30)$$

Затем две половинки кубика складывали и испытывали на сжатие. Усадка аглопоритобетона на балочках 4×4×16 см контролировалась оптическим длинномером ИЗА-2.

Динамический модуль упругости и коэффициент внутреннего трения аглопоритобетона определяли на приборе ИКВТ-2, показанном на рис. 51.

В данном приборе коэффициент внутреннего трения определяется с помощью резонансной характеристики, полученной при изгибных колебаниях образца по формуле [106]

$$K = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}f}, \quad (31)$$

где  $f$  – резонансная частота изгибных колебаний;

$\Delta f$  – ширина резонансной характеристики на уровне 0,5 (по обе стороны от резонанса).

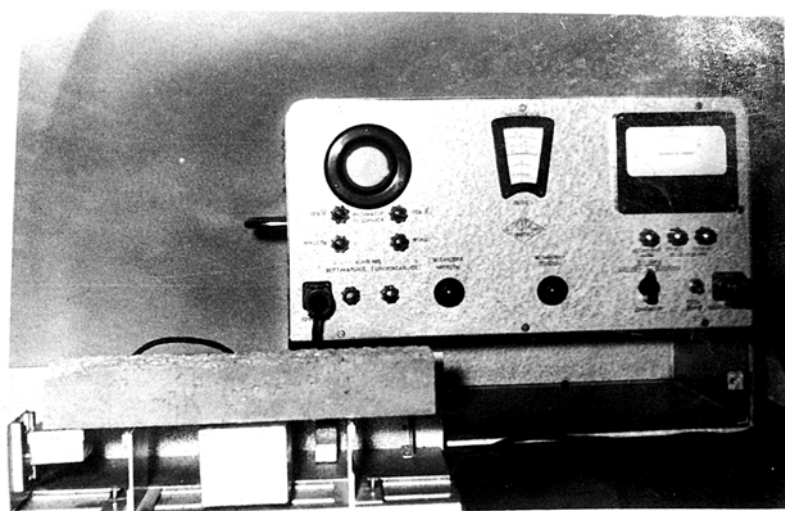


Рис. 51. Определение динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения легкого бетона на приборе ИКВТ-2

Пользуясь значением измеренной резонансной частоты колебаний образца, динамический модуль упругости определяли по формуле

$$E = 0,965 \cdot 10^{-6} \left( \frac{l}{b} \right)^3 \frac{p \cdot f^2}{a} \cdot T, \text{ кгс/см}^2, \quad (32)$$

где  $E$  – динамический модуль упругости, кг/см<sup>2</sup>;

$l$  – длина образца, см;

$p$  – вес образца;

$f$  – частота колебаний изгиба, Гц;

$b$  – высота сечения образца, см;

$a$  – ширина сечения образца, см;

$T$  – коэффициент, характеризующий размеры образца ( $T=1,02-1,2$ );

$0,965 \cdot 10^{-6}$  коэффициент учитывает основной вид колебаний образца и размерность выбранных единиц измерения.

Полученные в опытах результаты показаны на рис. 52-54 и табл.13. Эти данные позволяют утверждать, что последовательность загрузки материалов при приготовлении легкогобетонной смеси на заполнителях типа аглопорита оказывает значительное влияние на формирование физико-механических свойств бетона.

Таблица 13

Определяемые характеристики	Шифр серии					
	А		Б		В	
	Прочность на растяжение и сжатие, кгс/см <sup>2</sup>					
	$R_p$	$R_{сж}$	$R_p$	$R_{сж}$	$R_p$	$R_{сж}$
После пропаривания	13,5	105,0	18,2	150,0	15,1	130,0
В возрасте 28 суток	16,8	216,0	22,0	250,0	20,1	228,6

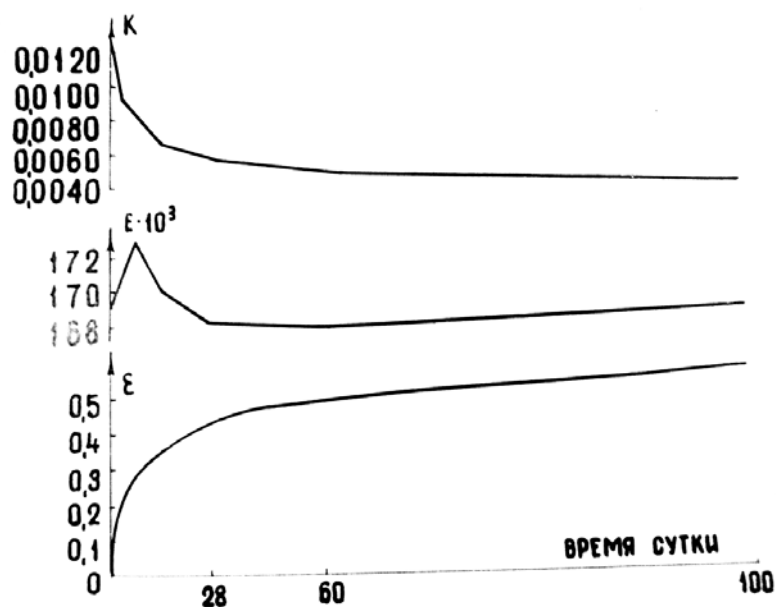


Рис. 52. Усадка –  $\epsilon$ , динамический модуль упругости –  $E$  и коэффициент внутреннего трения –  $K$  образцов серии Б

Как видно из данных табл. 13, образцы бетона серии Б показали наибольшие прочностные характеристики. Вероятно, это можно объяснить тем, что при этом способе перемешивания достигается лучшая кольматация пор заполнителя. Бесспорно, уже при смешивании сухих компонентов частицы цемента проникают в трудно доступные поры заполнителя. Эта кольматация пор в сухом состоянии будет в дальнейшем, при введении воды в бетонную смесь и в процессе самоуплотнения.



умирования, способствовать втягиванию этих частиц и продуктов гидратации далее в глубь зерна.

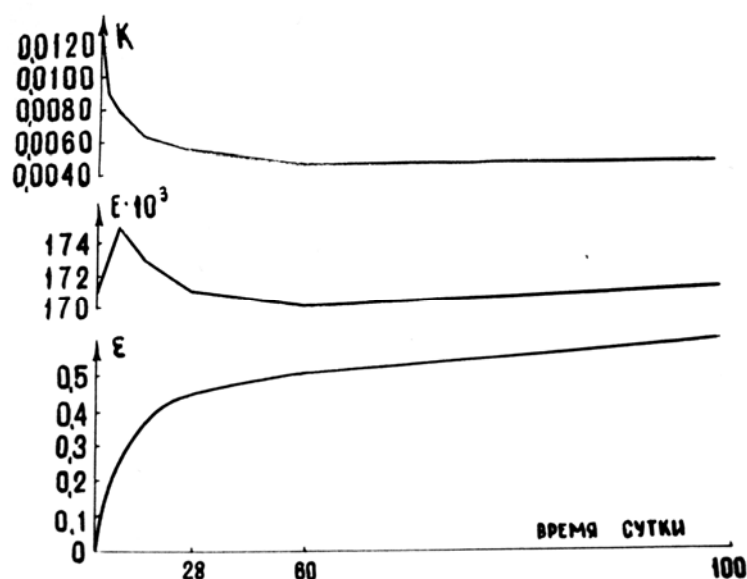


Рис. 53. Усадка –  $\epsilon$ , динамический модуль упругости –  $E$  и коэффициент внутреннего трения –  $K$  образцов серии В

В этом случае будет получаться идеальная модель бетона по И.Н. Ахвердову [1].

При смешивании компонентов бетона по серии А, прежде всего, следует отметить, что получающаяся бетонная смесь отличается повышенной жесткостью. Во-вторых, в образцах этой серии с самого начала перемешивания бетонной смеси начинается перемещение воды из заполнителя в цементный раствор. Эта миграция воды будет способствовать как бы аcolmатации пор заполнителя, что вместе с пониженной плотностью цементного камня, обусловленной его повышенной жесткостью, приводит к понижению прочностных характеристик бетона.

При приготовлении бетонной смеси по серии В, кольматация пор заполнителя раствором происходит менее качественно из-за его определенной связанности. Однако этот вопрос приготовления смеси позволяет получать лучшую структуру бетона по сравнению с способом А.

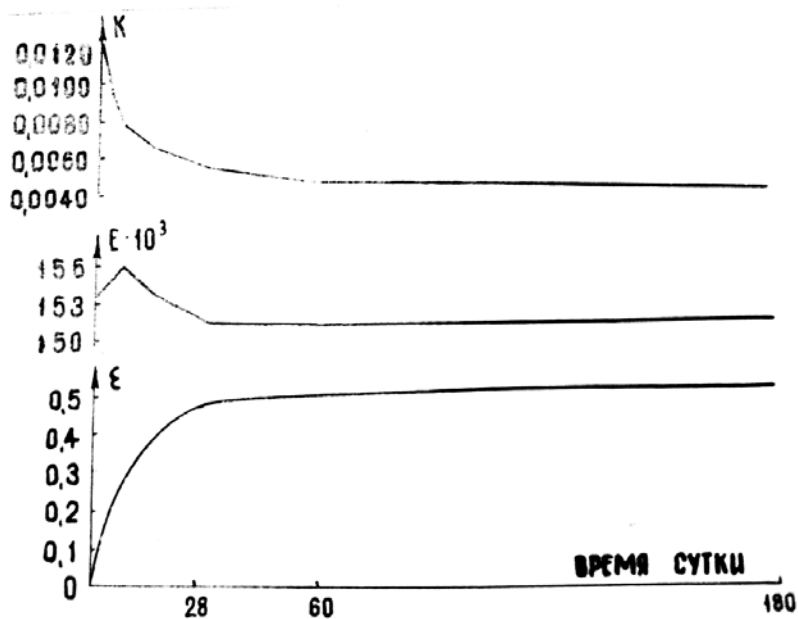


Рис. 54. Усадка –  $\epsilon$ , динамический модуль упругости –  $E$  и коэффициент внутреннего трения –  $K$  образцов серии А

Рассматривая усадку образцов бетона указанных способов перемешивания, следует отметить, что во всех сериях она незначительно отличалась друг от друга.

Однако это не говорит об одинаковых деформациях обжатия заполнителя. По-видимому, можно полагать, что в более плотной однородной структуре образцов серии Б будут в большей мере проявляться деформации обжатия заполнителя.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно прийти к выводу, что с точки зрения приготовления более однородной легковесной смеси на заполнителях типа аглопорита, в которой наилучшим образом будет проявляться эффект обжатия, является приготовление смеси по способу серии Б.

## 5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 5.1. Механическое поведение керамзитового гравия при осевом сжатии и растяжении

Известные в настоящее время сведения о механических свойствах керамзита не позволяют в полной мере объяснить разноречивые экспериментальные данные исследователей по виду диаграммы сжатия, упругости, деформациям ползучести и характеру разрушения керамзитобетона. Учитывая большое практическое значение понимания природы названных характеристик керамзитобетона для его дальнейшего применения, нами проведено изучение характера развития деформаций гранул керамзита при осевом сжатии и выяснение взаимосвязи между механическими свойствами и плотностью зерен керамзита [107].

В опытах использовали пензенский, пачелмский, октябрьский и никольский керамзитовый гравий объемной плотностью от 0,4 до 1,4 г/см<sup>3</sup>. При изучении деформаций зерен керамзита результаты опытов в значительной степени определяются методикой подготовки образца и проведения испытания. Поэтому для изготовления опытных образцов использовали как реальные гранулы керамзита, по торцам которых выполняли или опорную площадку из цементного раствора, или подшлифовку торцов, так и образцы-призмы правильной геометрической формы, которые получали путем обтачивания на наждачном круге керамзитовых гранул. При этом призмы имели размер грани основания от 8 до 15 мм с соотношением размера основания и высоты от 1/1,5 до 1/2,5.

Испытание образцов обоих видов производили с применением динамометров сжатия типа ДОСМ. Нагружение осуществляли ступенями в 0,1 ожидаемого предела прочности при сжатии. Деформации гранул измеряли с помощью прибора АИД-1М, для чего на подготовленные соответствующим образом поверхности образцов наклеивали тензометрические датчики в продольном и поперечном направлениях. При этом на образцах из реальных гранул целостность обжиговой корки не нарушали. На каждой ступени нагружения давали пятиминутную выдержку. Часть образцов была подвергнута циклическому воздействию нагрузки до уровня напряжения 0,6...0,85R. После пяти-шести циклов нагружения и разгрузки гранулы нагружали до

разрушения. Несколько гранул находились под воздействием длительной нагрузки в специальных пружинных установках для изучения деформаций ползучести при осевом сжатии.

В результате испытаний установлено, что применение образцов правильной геометрической формы позволяло вести их нагружение по физической оси вплоть до разрушающей нагрузки, тогда как любой другой прием подготовки образца с изготовлением тем или иным способом по торцам гранулы параллельных опорных площадок не удовлетворяет этому условию, что, в свою очередь, не позволяет четко изучить кривые деформаций и объемных изменений керамзитового заполнителя на всем диапазоне нагружения.

Оценка однородности керамзитового заполнителя сравниваемых образцов, проведенная по рассеянию значений прочности, показала, что коэффициент вариации прочности на образцах правильной геометрической формы составлял примерно 13 %, а на образцах из реальных гранул – 20 %. Для изучения взаимосвязи между механическими свойствами и плотностью зерен керамзита было подготовлено и испытано 115 образцов-призм и более 100 гранул. Число образцов было вполне достаточным для обеспечения необходимой достоверности полученных результатов при названных коэффициентах изменчивости прочности, точности опыта 5 % и вероятности результата 0,95.

На рис. 4.9 приведены данные, характеризующие взаимосвязь между пределом прочности при сжатии, модулем деформации на уровне обжатия  $\eta=0,5R$  и плотностью зерен керамзита. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ позволила получить следующие уравнения регрессии между прочностью, модулем деформации (МПа) и плотностью керамзита ( $\text{г/см}^3$ ):

для образцов правильной геометрической формы:

$$R = 23,79\gamma_k - 6,6; \quad (33)$$

$$E = 12800\gamma_k - 2400; \quad (34)$$

для образцов из реальных гранул:

$$R = 7,45\gamma_k + 2,63; \quad (35)$$

$$E = 7464\gamma_k - 1536. \quad (36)$$

Коэффициенты корреляции оказались равными 0,88; 0,67; 0,25 и 0,39 соответственно в уравнениях (33); (34); (35) и (36). Значения коэффициентов корреляции в уравнениях (33) и (34) свидетельствуют о достаточно выраженной линейной зависимости между исследуемыми параметрами, тогда как эти коэффициенты для уравнений (35) и (36)

позволяют говорить лишь о тенденции повышения прочности и модуля деформации керамзитовых зерен с увеличением их плотности. В данном случае коэффициенты корреляции четко отражают влияние строения и свойств обжиговой корки гранул на изучаемые зависимости.

Анализируя абсолютные значения прочности и модуля деформации в зависимости от плотности зерен керамзита и вида образцов на рис. 55, следует отметить, что удаление обжиговой корки гранул при изготовлении образцов-призм не приводило к уменьшению прочности и константы упругости керамзита. Более того, если образцы реальных гранул имели неровную, дефектную обжиговую оболочку, как это имело место в наших опытах, то они показывали, как видно из данных рис. 55, меньшие значения и прочности, и модуля упругости, что обусловлено, прежде всего, большей неоднородностью поля напряжений по сечению этих образцов при их испытании. Эти данные показывают, сколь велика роль формы и однородности строения образца при определении значений механических характеристик зерен керамзита.

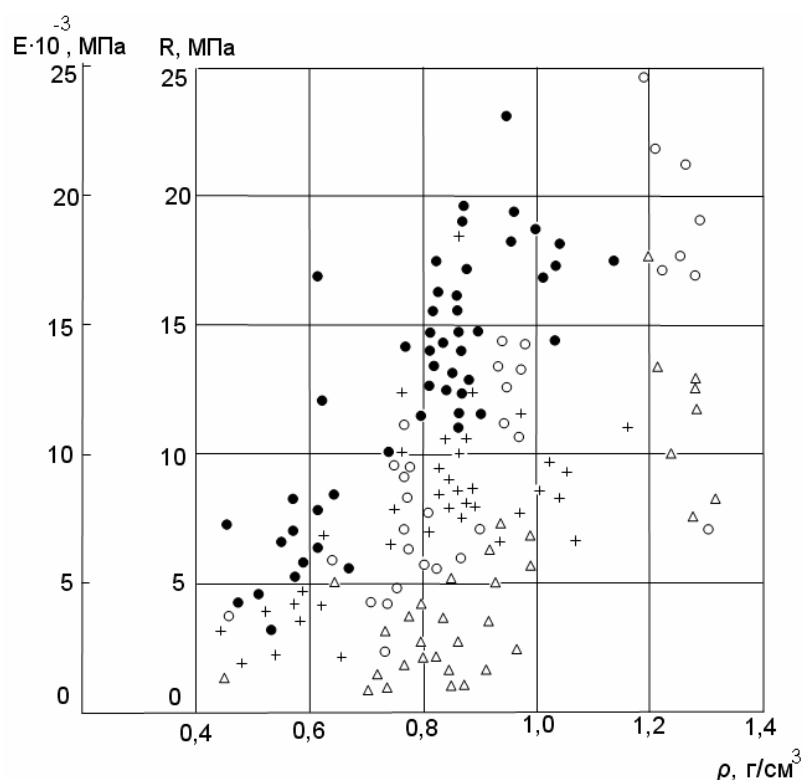


Рис. 55. Зависимость прочности и модуля деформаций при сжатии от плотности гранул керамзита:  
 предел прочности: образцов призм (●), образцов из гранул (○);  
 значения модуля деформаций: образцов-призм (+), образцов из гранул (Δ)

На графиках рис. 57, построенных по усредненным данным из испытания 10-12 образцов-призм, показан характер изменения модуля деформаций керамзитовых зерен при осевом сжатии с ростом уровня напряжений. Из графиков видно, что с ростом уровня  $\sigma/R$  до значения 0,6...0,7, а иногда и более, модуль деформации керамзита возрастает. Подобный характер кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  мы наблюдали и на образцах из реальных гранул Никольского керамзита, обладавшего бездефектной обжиговой коркой толщиной 0,12...0,17 мм. С увеличением толщины обжиговой корки характер кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  меняется. Так, для гранул пензенского керамзита, обладавших обжиговой коркой толщиной 0,8...2 мм, она характеризовалась выпуклостью уже в другую сторону, т.е. в сторону оси напряжений. Таким образом, можно утверждать, что вид диаграммы сжатия керамзитовых зерен в линейном напряженном состоянии зависит от их макроструктуры, т.е. объемного соотношения плотной обжиговой оболочки и пористого ядра гранулы. Различный характер диаграмм сжатия зерен керамзита Никольского и Пензенского керамзитовых заводов находит четкое отражение в диаграммах сжатия конструкционных керамзитобетонов на их основе [108]. Здесь уместно отметить, что при пятиминутной выдержке на этапах нагружения зерна керамзита проявляли очень незначительные пластические деформации, а при циклических испытаниях керамзита с разгрузкой после загрузки до уровня 0,6-0,85 R получены коэффициенты упругости, практически равные единице. Столь высокая упругость является специфическим свойством керамзита и характеризует микроструктуру его скелета как структуру достаточно высокой степени совершенства.

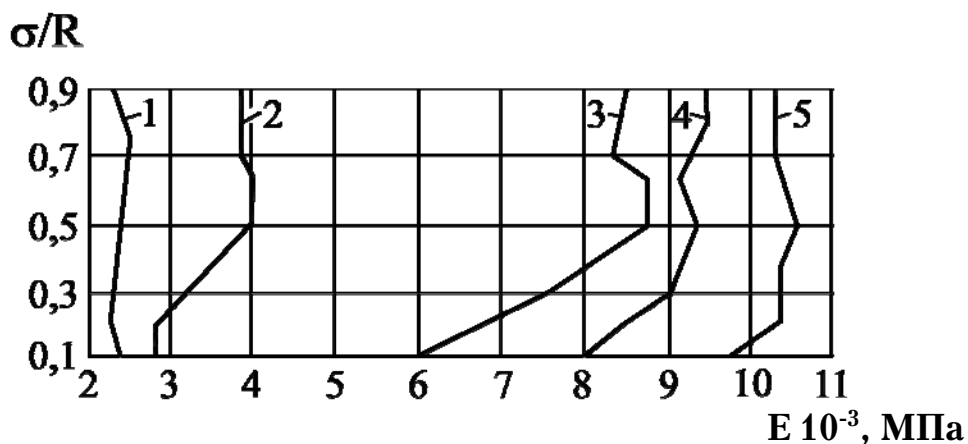


Рис. 56. Характер изменения модуля деформации гранул керамзита с ростом уровня напряжения:

1 –  $\gamma_k = 0,4 \dots 0,5$  г/см<sup>3</sup>; 2 –  $\gamma_k = 0,55 \dots 0,7$  г/см<sup>3</sup>; 3 –  $\gamma_k = 0,71 \dots 0,8$  г/см<sup>3</sup>;  
 4 –  $\gamma_k = 0,81 \dots 0,9$  г/см<sup>3</sup>; 5 –  $\gamma_k = 0,91 \dots 1,0$  г/см<sup>3</sup>

В этой связи необходимо заметить, что повышение модуля деформаций зерен керамзита с ростом уровня напряжений при осевом сжатии не является лишь следствием уплотнения зерна керамзита в результате его значительной сжимаемости. С учетом высокой упругости керамзита это явление имеет более сложную природу.

Рассматривая опытные данные по предельной сжимаемости керамзита, полученные как на образцах правильной геометрической формы, так и на реальных гранулах, следует отметить, что между предельной сжимаемостью и плотностью керамзита линейная взаимосвязь не усматривается. Замеренная нами предельная сжимаемость при уровне  $\sigma/R = 0,9...0,95$  составляла  $0,66...2,39$  мм/м, что согласуется с данными других исследователей. Предельная поперечная деформация расширения образцов-призм находилась в пределах от  $0,2$  до  $0,53$  мм/м. Коэффициент Пуассона керамзита исследуемых объемных масс составлял  $0,17...0,29$ . С увеличением плотности керамзита наблюдается тенденция роста величины названного коэффициента. Применение образцов-призм позволило нам вычислить дифференциальный коэффициент поперечной деформации  $\Delta\nu$  керамзитового заполнителя и изучить тем самым процесс микроразрушений его структуры на всем диапазоне нагружения.

На рис. 57 показан характер изменения дифференциального коэффициента  $\Delta\nu$  для тех же образцов, результаты испытания которых использованы для построения кривых рис. 56.

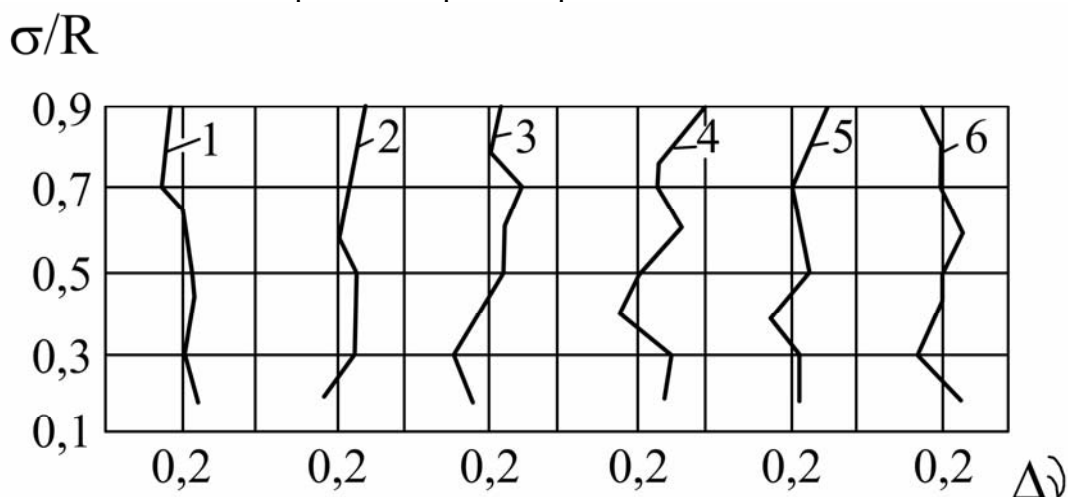


Рис. 57 Характер изменения дифференциального коэффициента поперечной деформации гранул керамзита с ростом уровня напряжения:

- 1 —  $\gamma_k = 0,4...0,5$  г/см<sup>3</sup>; 2 —  $\gamma_k = 0,5...0,6$  г/см<sup>3</sup>; 3 —  $\gamma_k = 0,6...0,7$  г/см<sup>3</sup>;  
 4 —  $\gamma_k = 0,7...0,8$  г/см<sup>3</sup>; 5 —  $\gamma_k = 0,8...0,9$  г/см<sup>3</sup>; 6 —  $\gamma_k = 0,9...1,0$  г/см<sup>3</sup>

Из графиков рис. 57 видно, что на всем диапазоне напряжений вплоть до уровня  $\sigma/R = 0,9$ , коэффициент  $\Delta\nu$  остается практически постоянным или незначительно отклоняется от первоначального значения. Подобный характер изменения  $\Delta\nu$  позволяет говорить о том, что при сжатии образцов правильной геометрической формы до напряжений  $0,9R$  происходит только уменьшение их объема. Причем, уменьшение объема сопровождалось накоплением упругой энергии, так как даже при столь высоком уровне напряжений мы не обнаруживали в керамзитовых образцах границы прогрессирующего развития микротрещинообразований –  $R_{ТЗ}/R_{пр}$  [109]. Разрушение керамзита при осевом сжатии проводили на реальных гранулах из николевского керамзита с плотностью  $0,96...0,97$  г/см<sup>3</sup>. Деформации ползучести замеряли индикаторами часового типа с ценой деления  $0,002$  мм на базе, равной высоте образца  $22...27$  мм. Наблюдение за образцами вели в течение  $84...90$  сут. Через  $60...65$  сут наблюдалась стабилизация деформаций ползучести. Опыты показали, что при уровне загрузки  $0,37...0,54R$  деформация ползучести зерен керамзита составляла  $0,5...0,66$  мм/м. При этом наибольшие удельные относительные деформации ползучести находились в пределах от  $6,7$  до  $8,6 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/кгс. Из этих данных следует, что при длительном действии нагрузки керамзитовый гравий обладает упруго-вязкопластическими свойствами.

Исследования керамзита в линейном напряженном состоянии осевого растяжения и сжатия в целом позволили получить новые сведения о его механических свойствах. Сопоставление и анализ полученных результатов при испытании керамзитового гравия и бетона на его основе позволяют провести необходимые обобщения по прочности керамзитобетона и объяснить отмеченную выше разноречивость экспериментальных данных. Здесь уместно отметить, что диаграмма сжатия керамзитобетона обусловлена соответствующей диаграммой как керамзитового гравия, так и растворной составляющей бетона. Причем с повышением эффективности керамзитобетона, т.е. с увеличением коэффициента насыщения керамзитом, увеличивается зависимость диаграммы сжатия керамзитобетона от рабочих диаграмм сжатия и поперечного расширения керамзита. Изменяя содержание керамзита в бетоне, можно изменять соотношение жесткостей его компонентов, регулируя тем самым упругопластические свойства керамзитобетона.

Опыты [108, 109] показывают, что вид диаграммы сжатия керамзитобетона обуславливает его удельные относительные деформации



ползучести и характер разрушения. Последовательность разрушения компонентов керамзитобетона зависит не только от их механических свойств, но не в меньшей мере и от граничных условий работы этих компонентов, обусловленных их объемным соотношением в бетоне.

Значительные работы по определению механических характеристик природных пористых керамических материалов выполнены в Армянском институте строительных материалов под руководством М.З. Симонова и в Ростовском инженерно-строительном институте под руководством Р.Л. Маиляна.

По данным М.З. Симонова, туфы арктического типа с пределами прочности при сжатии от 5,4 до 22,2 МПа имеют модули упругости при сжатии соответственно от 2060 до 4550 кгс/см<sup>2</sup>. Значения модулей упругости постоянны при напряжениях в интервале от 0,2 до 0,7. Предельная сжимаемость колеблется от 1,8 до 4,5 мм/м. Коэффициент Пуассона равен 0,21.

Маиляном Р.Л. были определены упругие характеристики известняка-ракушечника на образцах размером 40×40×160 мм. Значения модулей упругости изменялись в пределах от 37800 до 15000 МПа.

Значения модулей упругости для керамзита, установленные Н.А. Поповым на выпиленных призмах 7×7×21 см, при плотности 845, 945 и 1075 кг/м<sup>3</sup>, равны соответственно 9000, 10000 и 14000 МПа.

Модуль упругости шлаковой пемзы, установленный А.А. Васильковским на призмах размером 4×4×12 см, при плотности 1100 кг/м<sup>3</sup> и призмной прочности 7,6 МПа, равен 12650 МПа.

Столь высокое различие между механическими свойствами пористых материалов разного происхождения и разной структуры обусловлено разной структурой материалов, различием состава и химических связей.

Оценивая результаты исследований в целом, можно сделать вывод о том, что прочность керамзитового гравия в стальном цилиндре не может служить достаточно надежным показателем для проектирования состава конструкционного керамзитобетона с необходимыми механическими свойствами. Научно обоснованный подход к проектированию требует учитывать при этом диаграмму сжатия керамзитового гравия как обобщающую характеристику его механических свойств, которая, как это показано, может иметь различный характер на керамзите разных заводов. Использование этой характеристики при проектировании состава керамзитобетона позволит повысить его техническую и экономическую эффективность.

Исследования показывают, что разрушение конструкционного керамзитобетона при сжатии происходит от разрыва в поперечном направлении. Подобный характер разрушения бетона вызывает необходимость рассматривать зависимость его прочности не только от прочности и деформативности при сжатии керамзитового гравия, но также и от его прочности и деформативности при растяжении. Так как с повышением эффективности керамзитобетона увеличивается зависимость его механических свойств от прочностных и деформативных характеристик крупного заполнителя, более глубокое изучение этой зависимости имеет большое практическое значение. К сожалению, в специальной литературе сведений о прочности и деформативности зерен керамзите при растяжении недостаточно, что затрудняет обобщения по прочности керамзитобетона.

Нами проведена работа [110] по изучению характера развития деформаций гранул керамзита при осевом растяжении и установлению взаимосвязи между механическими свойствами и объемной массой керамзита. В опытах использовали пензенский, октябрьский и никольский керамзитовый гравий объемной массой в зерне от 0,68 до 1,47 г/см<sup>3</sup>.

Подготовка гранул к испытанию заключалась в следующем. По торцам большой оси гранулы с помощью эпоксидного клея закрепляли металлические кольца-захваты. Установку и приклеивание колец к грануле выполняли в специальных матрицах, изготовленных из пластилина или гипса. После отверждения эпоксидного клея производили необходимую подготовку поверхности гранул и наклеивали тензодатчики для замера продольных и поперечных деформаций. При подготовке гранул целостность их обжиговой корки не нарушали. Замер деформаций гранул производили с помощью прибора АИД-1М.

Испытание гранул на осевое растяжение производили путем загрузки их мерными грузами ступенями в 0,1 ожидаемой прочности на растяжение вплоть до разрушения. На каждой ступени нагружения гранулы выдерживали в течение 5 мин. Часть образцов была подвергнута циклическому воздействию нагрузки до уровня напряжений  $0,4...0,7R_p$ . Затем нагрузку полностью снимали и снова нагружали гранулы до разрушения. Несколько гранул находились под воздействием длительной нагрузки для изучения деформаций ползучести при осевом сжатии.

В результате испытаний установлено, что прочность и деформативность гранул керамзита на растяжение зависят не только от объемной массы, но также в значительной мере от степени совершенства их

структуры. Визуальный осмотр гранул до испытания и осмотр поверхности разрушения после испытания показали, что обжиговая корка зерен пензенского и октябрьского керамзита обладает большей дефектностью по сравнению с николевским керамзитом.

Анализ поверхности разрушения гранул показал, что разрушение зерен керамзита происходит по сечениям, ослабленным неоднородностью строения. Так, поверхности разрыва гранул николевского керамзита отличались, как правило, однородным мелкопористым строением ядра гранулы с характерным однотонным темно-серым цветом. Поверхности же разрыва гранул пензенского и октябрьского керамзита чаще имели дефектный характер. Эти поверхности характеризуются наличием воздушных полостей или раковин, а также обжиговой поверхностью устья трещины, проникающей внутрь зерна, что отчетливо просматривается по специфическому цвету, присущему обжиговой поверхности зерна. Влияние неоднородности строения зерен керамзита на их прочность при осевом растяжении можно проиллюстрировать изменчивостью этого свойства. Коэффициент вариации прочности зерен николевского керамзита объемной массой 0,95...1,15 г/см<sup>3</sup> составлял 21,9 %, тогда как для зерен пензенского и октябрьского керамзита названный коэффициент был значительно выше. Поэтому поставленная нами задача по изучению взаимосвязи между механическими свойствами и объемной массой зерен керамзита оказалась доступной для решения лишь на керамзите Николевского завода. Ниже изложены результаты опытов.

Для обеспечения необходимой достоверности полученных результатов при коэффициенте изменчивости прочности 21,9 %, точности опыта 5 % и вероятности результата 0,95 нами было подготовлено и испытано около 90 гранул. На рис. 58 приведены данные, характеризующие взаимосвязь между пределом прочности на растяжение и плотностью зерен керамзита. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ позволила получить следующее уравнение регрессии между прочностью и объемной массой:

$$R_p = 0,032 \cdot \gamma_k - 8,99. \quad (37)$$

Коэффициент корреляции оказался равным 0,69, что свидетельствует о достаточно выраженной линейной связи между исследуемыми параметрами. Отметим, что эта зависимость, вероятно, в значительной степени обусловлена минеральным составом керамзита. Так, из рис. 58 видно, что значения прочности, полученные нами на николевском

керамзите, существенно превышают значения прочности, полученные А.К. Яворским на горьковском керамзите.

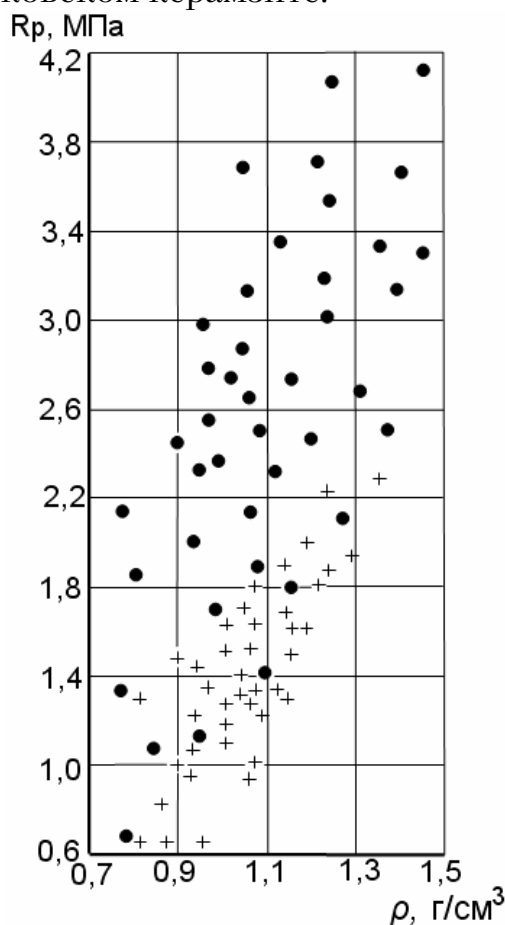


Рис. 58. Зависимость прочности на растяжение от плотности гранул керамзита:

● – по данным [110]; + – по данным Яворского А.К.

Анализируя результаты опытов по деформативности гранул керамзита, необходимо отметить, что при 5-минутной выдержке на каждом этапе нагружения вплоть до уровня напряжения  $0,9 R_p$  зерна керамзита не проявляли пластических деформаций. Циклическое нагружение образцов до уровня  $0,4...0,7 R_p$  и полная разгрузка показали, что гранулы керамзита обладают очень хорошей упругостью. В наших опытах было проведено восемь циклов нагружения и разгрузки. При этом деформации гранул при разгрузке характеризовались полной упругой обратимостью, а модуль деформаций гранул при разгрузке был равен модулю деформаций при загрузке. Хорошая упругость и хрупкий характер разрушения структуры керамзита при достаточно больших значениях предельной растяжимости позволили нам измерить модуль деформации на уровне разрушения гранул.

На рис. 59 показан характер изменения модуля деформаций керамзитовых зерен при растяжении с ростом уровня напряжений. Цифрами у каждой кривой указана объемная плотность гранулы ( $\text{г/см}^3$ ). С ростом уровня напряжения модуль деформации зерен керамзита изменяется скачкообразно и при этом в большинстве случаев (80,9 % испытанных гранул) константа упругости гранул повышается. Понижение константы упругости отмечали на гранулах, имевших небольшую относительную прочность. Пензенский и октябрьский керамзит также показали понижение константы упругости.

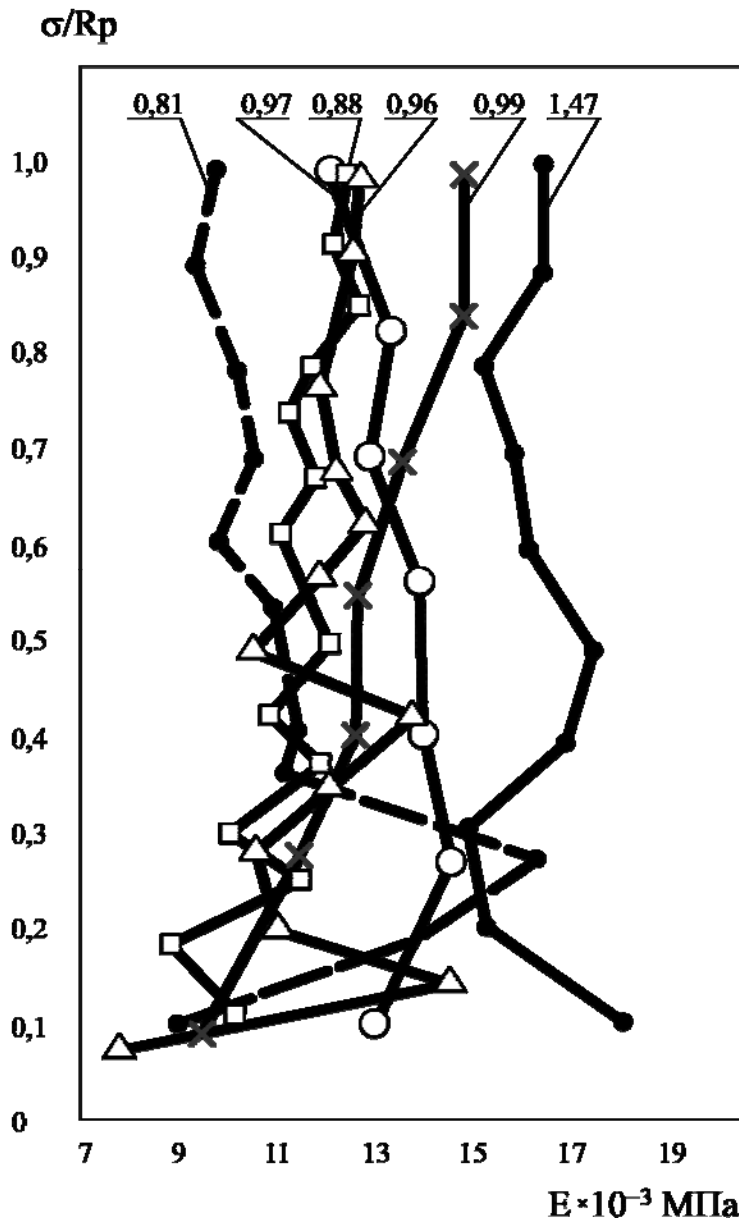


Рис. 59. Характер изменения модуля деформаций зерен керамзита разной плотности на кривой нагружения при осевом растяжении: цифрами у каждой кривой указана плотность керамзита в зерне

На рис. 60 приведена кривая 1, построенная по усредненным данным, характеризующая зависимость предельной растяжимости от плотности зерен керамзита. Абсолютные значения предельной растяжимости исследуемых гранул керамзита разной объемной массы находятся в пределах от 0,125 до 0,338 мм/м. Данные рис. 58 и 60 говорят о том, что между прочностью, предельной растяжимостью и объемной массой гранул керамзита имеется тесная связь, чего нельзя сказать о связи между модулем упругости и объемной массой. Определение упругой характеристики керамзита при осевом растяжении, вычисляемой из отношения модуля упругости к пределу прочности, показало, что лучшие значения упругой характеристики – у зерен керамзита с меньшей плотностью (кривая 2 рис. 60, построенная также по усредненным данным).

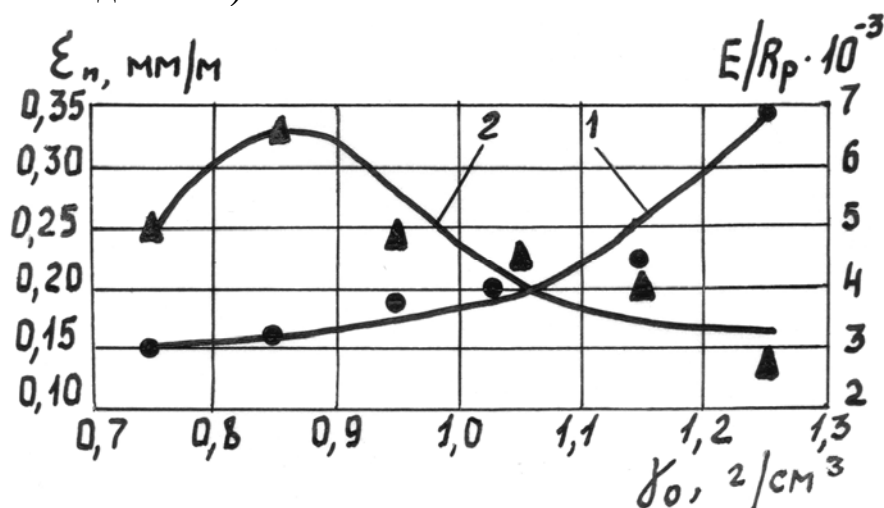


Рис. 60 Зависимость предельной растяжимости (1) и упругой характеристики (2) от плотности зерен керамзита

Одновременно с замером продольных деформаций мы пытались замерить и поперечные деформации. В пределах точности опыта гранулы керамзита при осевом растяжении не претерпевали поперечных деформаций, т.е. коэффициент Пуассона керамзита при осевом растяжении был равен нулю. Опыты по изучению деформаций ползучести зерен керамзита при осевом растяжении показали, что никольский керамзитовый гравий с плотностью 1,15...1,27 г/см<sup>3</sup> при уровне загрузки 0,38...0,5  $R_p$  не проявляет деформаций ползучести. Наблюдение за образцами вели в течение одного месяца. После разгрузки гранул мгновенные деформации загрузки упруго возвращались в исходное положение без проявления остаточных пластических деформаций.

Изучение поведения гранул керамзита при действии кратковременно и длительно действующей осевой нагрузки растяжения и полученные при этом результаты позволяют более глубоко понять физическую сущность диаграммы работы бетона под нагрузкой и процесса разрушения структуры бетона.

## 5.2. Механическое поведение термолита из опоки

В многочисленных исследованиях по пористым заполнителям из обожженных кремнистых пород и бетонам на их основе, анализ которых дан в работах [111], показано, что на основе термолитовых заполнителей могут быть получены легкие бетоны прочностью от 10 до 50 МПа. Техническая и экономическая эффективность этих бетонов, закладываемая на стадии проектирования их составов, обусловлена, прежде всего, оптимальным соответствием свойств заполнителя и цементного раствора проектируемой марке бетона. При этом, как известно, одной из важнейших характеристик, определяющей указанную эффективность бетона, является характеристика упругих свойств крупного заполнителя.

В опубликованных работах по пористым заполнителям из обожженных кремнистых пород практически отсутствуют сведения об их упругих свойствах. В этой связи при исследовании термолитового заполнителя из опоки Кижеватовского месторождения (вблизи г. Пензы) значительное внимание было уделено изучению деформационных свойств опочной породы и термолита на ее основе [112].

Опока этого месторождения характеризовалась пятнистой окраской от светло-серой до темной с бурыми включениями лимонита. Порода плотная с раковистым изломом, слабопористая. Под микроскопом представлена желтоватой массой (85 %), состоящей из зерен и спикул губок, замещенных опалом и кристобалитом, сцементированных глинистыми частицами. Показатель преломления основной массы  $n_{cp} = 1,530$ . На термограмме опоки фиксируются четыре эндотермических (140, 540, 580 и 890 °С) эффекта, отражающих соответственно дегидратацию опала и гидрослюд, выделение конституционной воды и начало разрушения структуры гидрослюдистых минералов и монтмориллонита, полиморфное превращение кварца, разрушение структуры гидрослюд и монтмориллонита. Результаты ДТА подтверждаются данными рентгенофазового анализа и электронно-микроскопическими наблюдениями. Химический состав опоки приведен в табл. 14.

Таблица 14

По- рода	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	ППП	орг. вещ-ва
Опока	84,88	4,6	3,12	0,12	0,38	1,05	0,53	0,24	1,87	2,98

Для изучения структурно-фазовых превращений опоки в процессе ее нагревания применяли комплексный метод исследования, включающий определение фазового состава, проведение дилатометрического и рентгенофазового анализа, электронномикроскопических наблюдений, а также петрографических исследований в отраженном, поляризованном и люминисцентном свете. Опыты показали, что в процессе нагревания происходило смешанное твердожидкостное спекание опоки. Спекание сопровождалось кристаллизацией аморфной SiO<sub>2</sub> в кристобалит и оплавлением кристаллических новообразований (гематита), обеспечивающих формирование прочной структуры твердой фазы заполнителя.

Для определения важнейших физико-механических свойств опоки и термолита из породы были изготовлены с помощью алмазного диска образцы-призмы правильной геометрической формы в количестве 100 штук. Высота образцов была в пределах от 15 до 30 мм, а сечение от 8×8 до 16×16 мм.

Обжиг образцов проводили при температуре 1190, 1200, 1240, 1250 и 1270 °С. Время обжига 7...8 мин. Термоподготовка при температуре 300-700 °С в течение 15...30 мин. Остывание образцов после обжига – как в естественных лабораторных условиях, так и в остывающей от 300 °С муфельной печи. Около 30 образцов, обожженных при температуре 1240 °С, остывали непосредственно в выключенной печи обжига.

Независимо от режима термообработки возникающие термические напряжения в материале приводили к возникновению в образцах более крупного сечения одной или нескольких поверхностных трещин, видимых невооруженным глазом и ориентированных, как правило, перпендикулярно продольной оси образца. В более мелких образцах трещины обжига заметны лишь под микроскопом. В целом, термическая обработка не вызывала изменения геометрии и состояния поверхности образцов, полученных после их выпиливания из породы, и они были пригодны под наклейку тензодатчиков. Деформационные свойства термолита и опоки определяли тензометрическим методом с помощью прибора АИД-1М. При этом при наклейке тензорезисторов их базу располагали вне пределов поверхностных трещин, видимых



невооруженным глазом. Для замера продольных деформаций были использованы тензодатчики с базой 10 мм. Физико-механические свойства породы определяли на образцах, предварительно высушенных при 105 °С.

В табл. 15 приведены основные свойства необожженной и обожженной опоки Кижеватовского месторождения, определенные в соответствии с ГОСТ 9758-77. Значения доверительных оценок важнейших свойств определены с надежностью 0,95. При этом следует отметить, что прочностные и деформационные свойства термолита вычислены как средние по результатам испытания 30 образцов. Для определения других свойств опоки и термолита использовались данные результатов испытаний 10 образцов.

Т а б л и ц а 15

Свойства	Единица измерения	Опока	
		необожженная	обожженная
Объемная плотность в куске	г/см <sup>3</sup>	1,51±0,03	1,43±0,105
Пикнометрическая плотность	“	2,02-2,4	2,32
Водопоглощение по массе	%	16,9±5,61	14,1±1,68
Водопоглощение по массе за 48 ч	“	23,9±5,03	-
Прочность при осевом сжатии	МПа	45,88±5,03	47,37±7,85
Коэффициент размягчения		0,63	0,80
Коэффициент размягчения за 48 ч водопоглощения		0,49	-
Начальный модуль упругости при $\eta=0,2R$	МПа	11128±4544	4984±1201
Модуль деформации при $\eta=0,9R$	“	9418±3188	5902±1034
Сжимаемость при $\eta=0,9R$	мм/м	4,434±1,676	6,593±0,682
Объемная огневая усадка	%	-	5,02±0,82

Из данных табл. 15 видно, что объемная плотность термолита несколько ниже, чем у породы. Лишь на незначительной части образцов, характеризовавшихся объемной огневой усадкой в пределах 9...13 %, наблюдали увеличение объемной плотности. Использование корреляционного анализа при изучении зависимости между величинами объемной огневой усадки и объемной плотности опоки показало отсутствие линейной зависимости между этими величинами, так как коэффициент корреляции был равен 0,04. В то же время между объемной огневой усадкой и температурой обжига усматривается линейная корреляционная зависимость. При этом следует отметить, что коэффициент корреляции этой зависимости оказался отрицательным и был равен 0,65. Отсюда следует, что обжиг опоки в интервале температур от 1190 до 1270 °С сопровождался уменьшением объемной огневой усадки с увеличением температуры.

Из рассмотрения прочности на сжатие следует, что в результате обжига прочность материала не претерпевала принципиальных изменений. Однако, дисперсия прочности термолита несколько возрастала. Коэффициент размягчения опоки был равен 0,63, а за 48 часов водопоглощения – 0,49.

Коэффициент размягчения термолита составил 0,8. Изучение морозостойкости термолита показало, что он не выдерживал 15 циклов замораживания и оттаивания. Что касается деформационных свойств, то, как видно из данных табл. 15, обжиг опоки приводит к существенному, примерно в два раза, уменьшению значения начального модуля упругости термолита. Предельная сжимаемость при уровне загрузки, равном 0,9, составляла 4,434 и 6,593 мм/м соответственно для опоки и термолита. Значения предельной сжимаемости термолита значительно превосходят сжимаемость зерен керамзита [107]. Определение упругой характеристики термолита при осевом сжатии, вычисляемой из отношения модуля упругости к пределу прочности, показало, что она примерно в 5-6 раз меньше упругой характеристики зерен керамзита с объемной плотностью, равной 1,0.

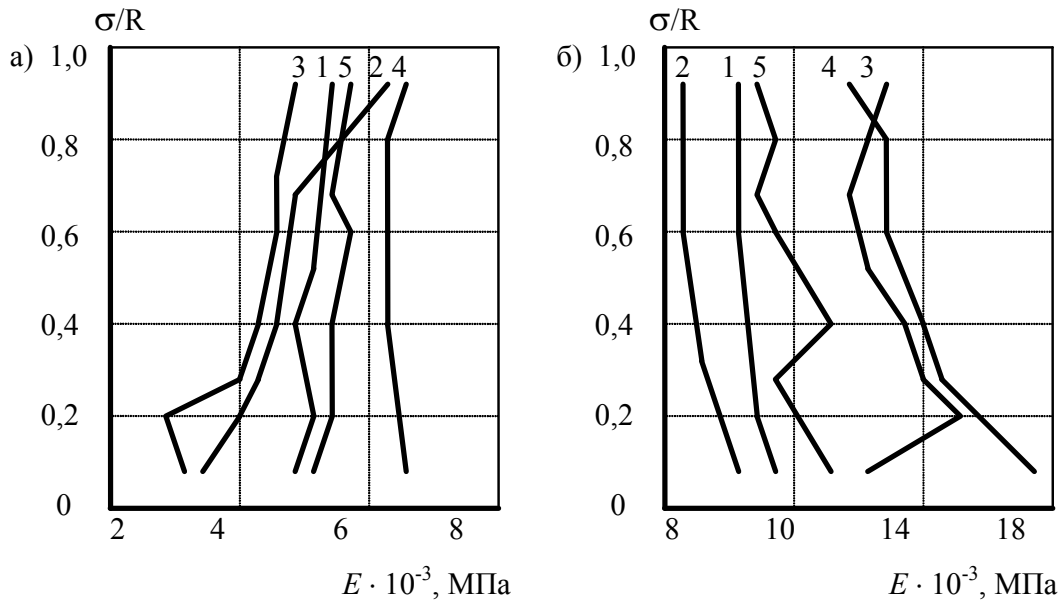


Рис. 61. Характер изменения модуля деформаций термолита (а) и опоки (б) с ростом уровня напряжений:

- а) 1 –  $\gamma_k = 1,3 \text{ г/см}^3$ ; 2 –  $\gamma_k = 1,42 \text{ г/см}^3$ ; 3 –  $\gamma_k = 1,43 \text{ г/см}^3$ ;  
 4 –  $\gamma_k = 1,48 \text{ г/см}^3$ ; 5 –  $\gamma_k = 1,53 \text{ г/см}^3$ ;  
 б) 1 –  $\gamma_k = 1,48 \text{ г/см}^3$ ; 2 –  $\gamma_k = 1,49 \text{ г/см}^3$ ; 3 –  $\gamma_k = 1,56 \text{ г/см}^3$ ;  
 4 –  $\gamma_k = 1,58 \text{ г/см}^3$ ; 5 –  $\gamma_k = 1,68 \text{ г/см}^3$

На графиках рис. 61 показан характер изменения модуля деформаций заполнителя на кривой его нагружения. Из графиков отчетливо видно, что с повышением уровня загрузки кривая  $\sigma - \epsilon$  образцов из опоки характеризовалась выпуклостью к оси напряжения, а для образцов термолита, – наоборот, выпуклостью к оси деформации. Выпуклость кривых нагружения  $\sigma - \epsilon$  к оси деформаций характерна и для керамзитового заполнителя [107]. Анализ графиков рис. 61 показывает, что с ростом уровня напряжения происходит не только повышение значений модуля деформации термолита, но и улучшение показателя однородности модуля для данной выборочной совокупности образцов. Вычисление коэффициента вариации показало, что однородность значений модуля деформации при уровне нагружения  $0,9R$  была примерно на 27 % лучше, чем у начального модуля упругости. Отмеченный характер изменения однородности модуля деформации термолитового заполнителя в линейном напряженном состоянии, вероятно, будет иметь место и для заполнителя в объемном напряженном состоянии в бетоне, что окажет позитивное влияние на однородность поля напряжений в структуре термолитобетона.

Таким образом, структурно-фазовые превращения, происходящие в опоке при ее обжиге, сопровождаются не только уменьшением значений модуля упругости, но и принципиальным изменением характера диаграмм сжатия пористого заполнителя.

Сравнивая термолитовый заполнитель с керамзитовым, можно говорить о значительном преимуществе термолитового заполнителя по прочности. Что же касается упругих свойств, то объективное суждение можно будет составить по результатам испытания термолито- и керамзитобетона. Полученные в опытах результаты позволяют судить о деформационных характеристиках термолита и производить его сравнение с другими искусственными крупными пористыми заполнителями по показателю модуля упругости – одной из важнейших структурных характеристик заполнителей конструкционного назначения, а также позволяет более обоснованно подходить к проектированию состава бетона на основе термолита.

### 5.3. Механическое поведение керамзитобетона на структурных моделях бетона

В работах [113, 114] отмечается, что независимо от характера напряженного состояния в композитном материале возникает внутреннее поле истинных напряжений и деформаций, которые “рельефно” повторяют степень различия модулей упругости заполнителя и матричного материала. В общем случае деформационный закон циклического материала эквивалентен деформационному закону материального цикла, т.е. по структуре идеализированной среды можно судить о составе закона поведения реального материала.

Модель бетона была принята нами [115] в виде материальных циклов, различающихся между собой формой и размером элементов одиночных включений (заполнителя) в матрице (цементно-песчаный раствор) при  $E_b=0$ ;  $E_b \gg E_m$  и  $E_b \leq E_m$  (где  $E_b$  и  $E_m$  – соответственно модули упругости включений и матрицы). Все модели имели одинаковые геометрические размеры – плоские прямоугольные пластинки  $100 \times 50 \times 15$  мм. Выбор толщины пластины продиктован также максимальной крупностью пористого заполнителя для конструкционных легких бетонов.

Было изготовлено пять серий образцов моделей бетона, различавшихся по виду и объемному содержанию включений. Матричная основа всех моделей была одинаковой и состояла из цементно-песчаного раствора 1:1 по массе и В/Ц отношении, равном 0,4. При

этом использовали портландцемент Вольского завода марки 400 и сурский речной песок с модулем крупности 1,57. После формования моделей бетона они твердели в течение 28 суток в нормальных условиях в эксикаторе над водой. Для оценки механических свойств матричной основы моделей из одного замеса цементно-песчаного раствора одновременно изготавливали как модели бетона, так и образцы тех же размеров 100×50×15 мм из одного матричного материала.

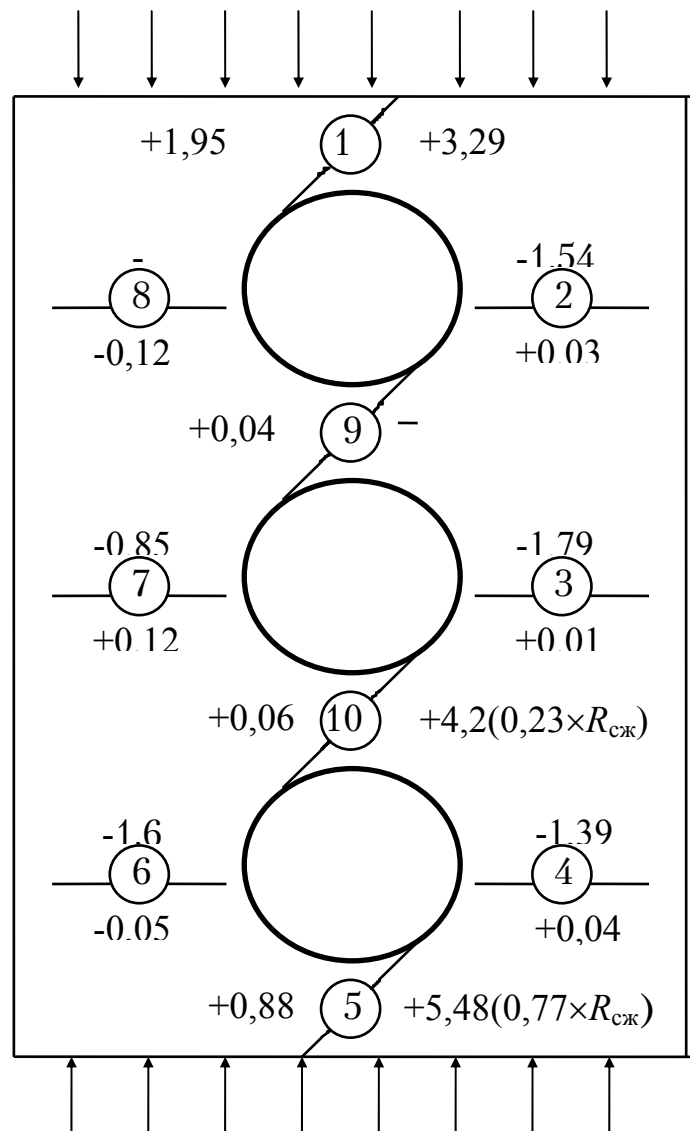


Рис. 62. Деформированное состояние характерных зон модели бетона с тремя пустотами при  $\sigma=0,92R_{сж}$ :

○ – характерные зоны;

“-“ – деформация сжатия в мм/м (числитель);

“+” – деформация растяжения в мм/м (знаменатель);

$$R_{сж}^{PM} = 62,5 \text{ МПа} \quad R_{сж}^{KM} = 20,5 \text{ МПа}$$

$$\epsilon_1^{PM} = 4,18 \text{ мм/м} \quad \epsilon_1^{KM} = 1,43 \text{ мм/м}$$

На рис. 62 показана модель бетона с тремя пустотами диаметром 20 мм, доля которых в объеме модели составляла 0,19. На рис. 64 – с тремя металлическими включениями диаметром 20 мм. На рис. 66 – с тремя металлическими включениями диаметром 20 мм, которые были обернуты в кальку с целью исключения адгезионного сцепления между включением и матрицей. На рис. 68 – с тремя обточенными гранулами керамзита размером  $2 \times 1,5 \times 1,5$  см, доля которых в объеме модели составляла 0,18, и на рис. 72 – с шестью гранулами тех же размеров, доля которых составляла 0,36.

На плоскости каждой модели (рис. 62; 64; 66; 68 и 72) показано от десяти до девятнадцати характерных зон поля деформаций, в которых после соответствующей подготовки поверхности наклеивали крестом тензодатчики омического сопротивления с базой 5 и 10 мм с двух противоположных сторон модели для замера продольных и поперечных деформаций в этих зонах при механическом нагружении моделей на осевое сжатие.

На рис. 62; 64; 66; 68 и 72 приведены численные значения деформаций в характерных зонах модели. При этом в числителе указаны деформации вертикальных тензодатчиков – сжатия в мм/м, а в знаменателе – деформации горизонтальных тензодатчиков – растяжения в мм/м при соответствующей интенсивности напряжений, указанной на рисунках.

Механические испытания моделей бетона всех видов проводили в возрасте 28 суток. Сжимающая нагрузка передавалась с помощью гидравлического пресса с ручным управлением на короткие торцевые поверхности моделей. Нагружение осуществляли ступенями в 0,1 ожидаемой прочности на сжатие вплоть до разрушения. На каждой ступени нагружения давали 5-минутную выдержку с целью снятия показаний тензодатчиков – сопротивления с помощью измерителя деформаций АИД-1 м.

Из анализа напряженно-деформированного состояния характерных зон поля деформаций модели бетона с тремя пустотами (рис. 62) следует, что наиболее опасными зонами по концентрации напряжений растяжения являются зоны “9” и “10”, т.е. перемычки между пустотами. Уже при интенсивности напряжения  $0,23 R_{сж}$  растяжение в зоне “10” составляло 4,2 мм/м, а в зоне “9” еще больше, так как тензодатчик претерпел разрыв.

Модуль упругости матричного материала этой модели составлял  $21,8 \cdot 10^3$  МПа, следовательно, напряжения растяжения в зоне “10” составляли соответственно 91,5 МПа, что в 19,5 раз превышало среднее напряжение сжатия в модели. Затем по степени опасности концентрации напряжений растяжения следуют зоны “5” и “1”, т.е. перемычки, прилегающие к плитам прессы. Возникающее трение на

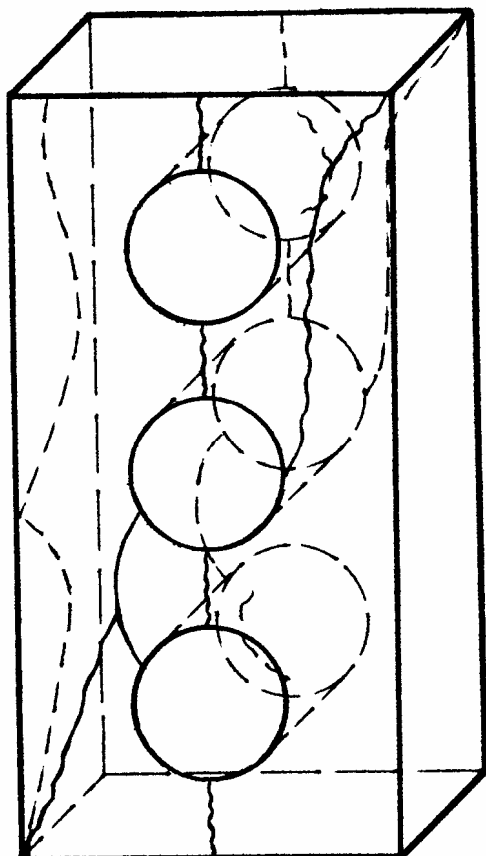


Рис. 63. Характер роста макротрещин при разрушении модели бетона с тремя пустотами:

- — макротрещины с лицевой стороны модели;
- - - - - то же, с тыльной стороны

показала относительно матричного материала снижение прочности на осевое сжатие с 62,5 до 20,5 МПа и уменьшение предельной сжимаемости с 4,18 до 1,43 мм/м.

торцовых поверхностях модели в этом случае как бы способствует разгрузке этих зон и все-таки деформация растяжения в этих зонах при интенсивности напряжения сжатия от 0,77 до  $0,91 R_{сж}$  составляла соответственно 5,48 и 3,29 мм/м.

Отличительной особенностью напряженного состояния модели (рис. 62) является и то, что во всех перемычках между отверстиями (зоны “1”, “9”, “10” и “5”) на всех уровнях нагружения создается двухосное напряжение растяжения, что обусловлено, на наш взгляд, незначительной трансформацией круглого отверстия модели под нагрузкой осевого сжатия в эллипсоид, что и приводит, в свою очередь, к деформациям растяжения в вертикальной плоскости названных зон вместо предполагаемого сжатия.

На рис. 63 показана картина и характер расположения и развития макротрещин при разрушении модели бетона с тремя отверстиями. Зоны “9” и “10” являются очагом начала возникновения и развития трещин.

В целом, эта модель бетона

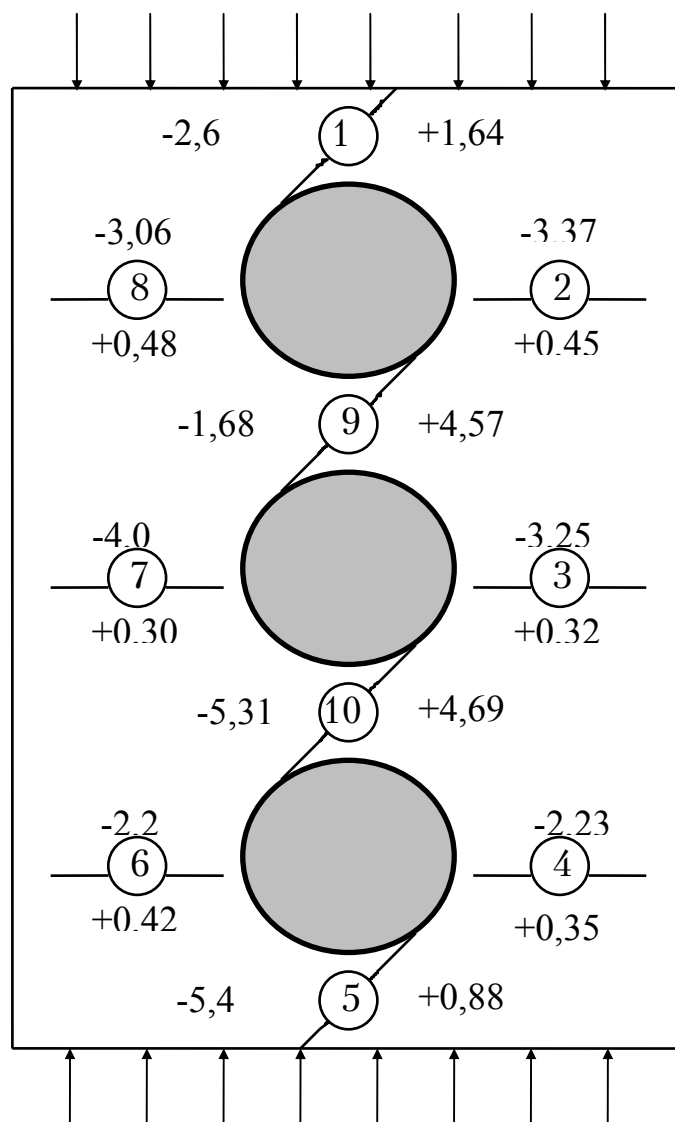


Рис. 64. Деформированное состояние характерных зон модели бетона с тремя металлическими вкладышами при  $\sigma=0,91R_{сж}$ :

○ – характерные зоны;

“-“ – деформация сжатия в мм/м (числитель);

“+” – деформация растяжения в мм/м (знаменатель);

$$R_{сж}^{PM} = 58,9 \text{ МПа} \quad R_{сж}^{KM} = 57,9 \text{ МПа};$$

$$\epsilon_1^{PM} = 3,54 \text{ мм/м} \quad \epsilon_1^{KM} = 3,02 \text{ мм/м}$$

Из анализа напряженно-деформированного состояния характерных зон поля деформаций модели бетона с тремя металлическими бобышками (рис. 64) при интенсивности напряжения  $0,91 R_{сж}$  с учетом  $E_B \gg E_M$ , хорошей адгезии металла включений с матрицей и принципа совместности деформаций следует отметить, что наиболее напряженными



участками модели как по деформациям растяжения, так и сжатия, являются зоны “10” и “9”. Существенная разница между  $E_b$  и  $E_m$ , а также совместность деформаций включений и матрицы приводили к

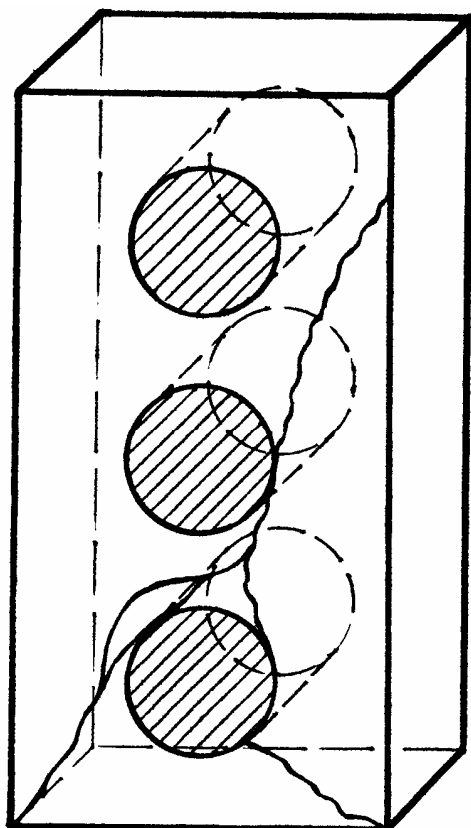


Рис. 65. Характер роста макротрещин при разрушении модели бетона с тремя металлическими вкладышами:  
 ———— — макротрещины с лицевой стороны модели;  
 - - - - - — то же, с тыльной стороны

увеличению деформаций сжатия в этих зонах относительно средних деформаций в остальных зонах модели примерно в 1,8 раза и к увеличению деформаций растяжения в этих зонах – примерно в 12 раз.

На рис. 65 показан характер разрушения данной модели под нагрузкой. Начало зарождения и развития макротрещины разрушения находилось в зоне “10”, от которой макротрещина стала прорастать по адгезионному контакту ниже и выше расположенной металлической бобышки, что приводило к окончательному разрушению модели.

В целом, модель бетона (рис. 64) показала относительно матричного материала практически одинаковую прочность при осевом сжатии, т.е. 57,9 и 58,9 МПа соответственно. Однако, предельная сжимаемость модели составила 3,02 мм/м, а матрицы – 3,54 мм/м, что приводило к увеличению модуля упругости модели бетона.

Из анализа напряженно-деформированного состояния характерных зон поля деформаций модели бетона с тремя металлическими вкладышами, изолированными от контакта с матричным материалом с помощью кальки (рис. 66), следует, что исключение адгезии между составляющими модели усугубляет деформированное состояние в зонах “10” и “9”. Уже при уровне напряжения  $0,29 R_{сж}$  в этих зонах деформации растяжения составляли соответственно 1,86 и 1,63 мм/м. При дальнейшем нагружении тензодатчики этих зон претерпевали разрыв, т.е. теряли целостность от раскрытия трещин разрушения.

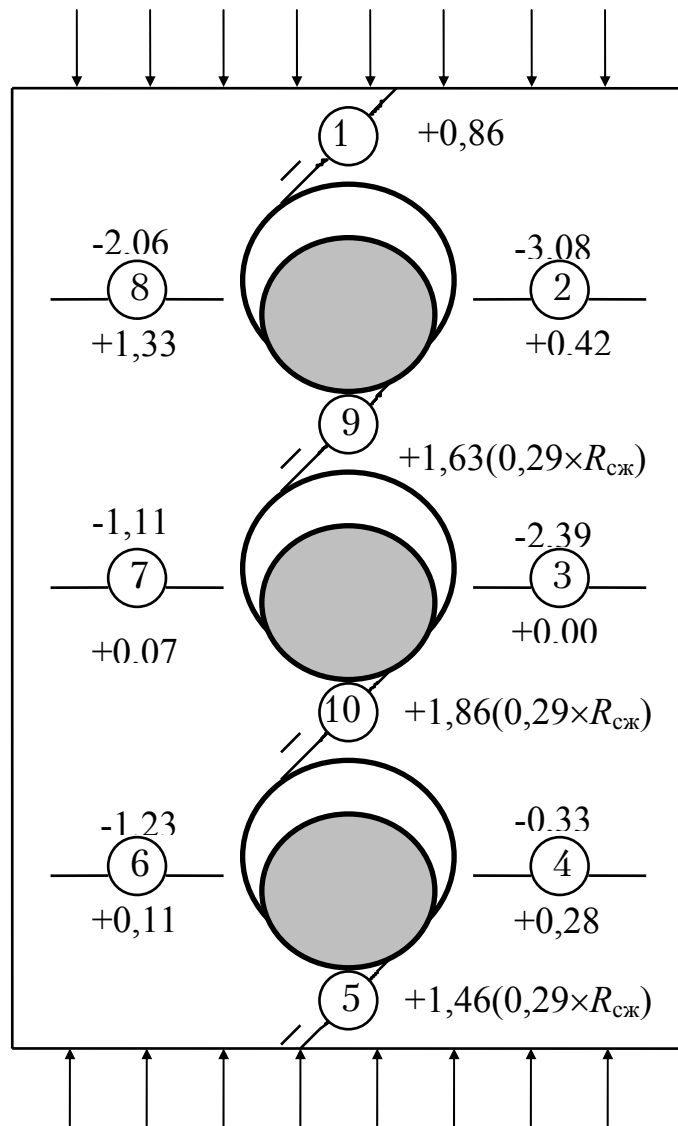


Рис. 66. Деформированное состояние характерных зон модели бетона с тремя металлическими вкладышами через кальку при  $\sigma=0,88R_{сж}$ :

○ – характерные зоны;

“-“ – деформация сжатия в мм/м (числитель);

“+” – деформация растяжения в мм/м (знаменатель);

$$R_{сж}^{PM} = 47,4 \text{ МПа} \quad R_{сж}^{KM} = 18,0 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_1^{PM} = 3,63 \text{ мм/м} \quad \varepsilon_1^{KM} = 1,7 \text{ мм/м}$$

На рис. 67 показан характер расположения и развития макротрещин разрушения этой модели, из которого следует, что зоны “10” и “9” являются очагами разрушения.

Исключение адгезии между металлическими бобышками и матричным материалом приводило к снижению прочности модели на сжатие относительно матричного материала с 47,4 до 18,0 МПа, а также к уменьшению деформативности с 3,63 до 1,7 мм/м.

Прежде чем анализировать предельное напряженно-деформированное состояние характерных зон модели бетона с тремя гранулами керамзита (рис. 68) при интенсивности напряжения  $0,91 R_{сж}$ , отметим некоторые методические особенности подхода к этому анализу.

Перед изготовлением модели керамзитобетона гранулы керамзита правильной геометрической формы, размером, как было отмечено выше,  $1,5 \times 1,5 \times 2$  см, подвергали деформационному тарированию

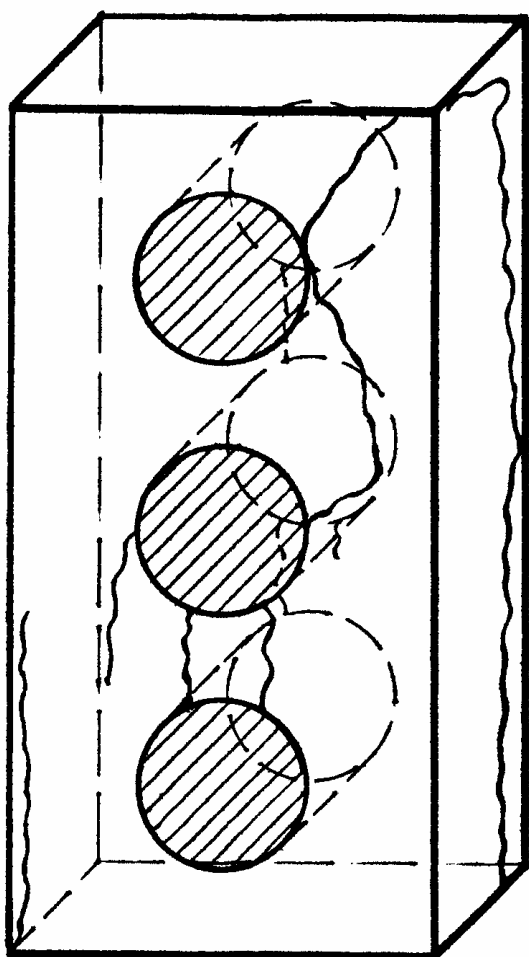


Рис. 67. Характер роста макротрещин при разрушении модели бетона с тремя металлическими вкладышами через кальку:

- — макротрещины с лицевой стороны модели;
- — то же, с тыльной стороны

тензометрическим методом. Осевое нагружение сжатия образцов керамзита осуществляли с помощью образцового динамометра типа ДОСМ-1.

На рис. 69 приведены деформационные тарировочные кривые трех гранул, используемых для изготовления одной из моделей этого вида. Напряжение в гранулах при их тарировке достигало  $0,4 \dots 0,5$  предела прочности на осевое сжатие. Из графиков рис. 69 виден характер гистерезиса деформаций при разгрузке образцов, в цифровой форме на поле рисунка приведена величина пластической деформации ( $\epsilon_n$ ) зерен после тарировки, а также плотность и модуль упругости зерен керамзита. Как следует из эксперимента, модуль упругости матрицы этой модели составлял  $21,9 \cdot 10^3$  МПа, а зерен керамзита под номерами 7, 25 и 19 – соответственно  $13,57 \cdot 10^3$ ;  $20,28 \cdot 10^3$  и  $25,12 \cdot 10^3$  МПа, т.е. для модели бетона (рис. 68) характерны три варианта

соотношения  $E_B$  и  $E_M$ , а, именно,  $E_B < E_M$ ,  $E_B = E_M$  и  $E_B > E_M$ , что соответствует реальной однородности механических свойств керамзитового гравия.

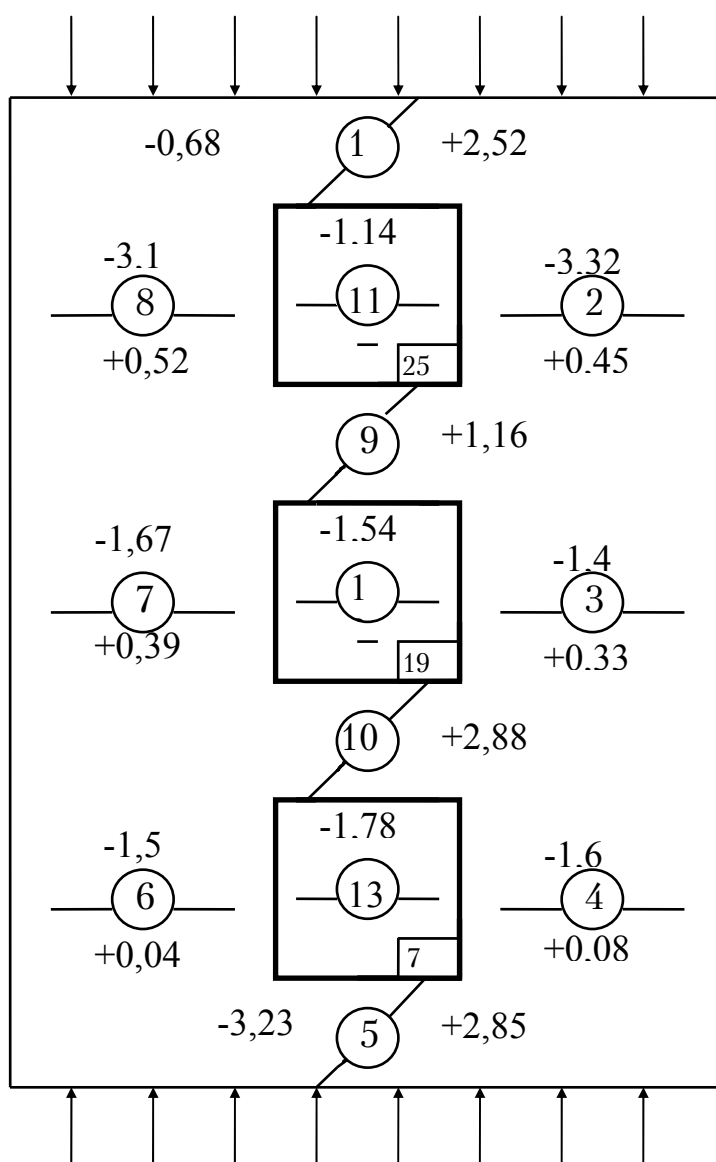


Рис. 68 Деформированное состояние характерных зон модели бетона с тремя гранулами керамзита при  $\sigma=0,91R_{сж}$ :

○ – характерные зоны;

□ – номера гранул;

“-“ – деформация сжатия в мм/м (числитель);

“+” – деформация растяжения в мм/м (знаменатель);

$$R_{сж}^{PM} = 56,8 \text{ Мпа} \quad R_{сж}^{KM} = 44,0 \text{ Мпа};$$

$$\epsilon_1^{PM} = 3,52 \text{ мм/м} \quad \epsilon_1^{KM} = 1,98 \text{ мм/м}$$

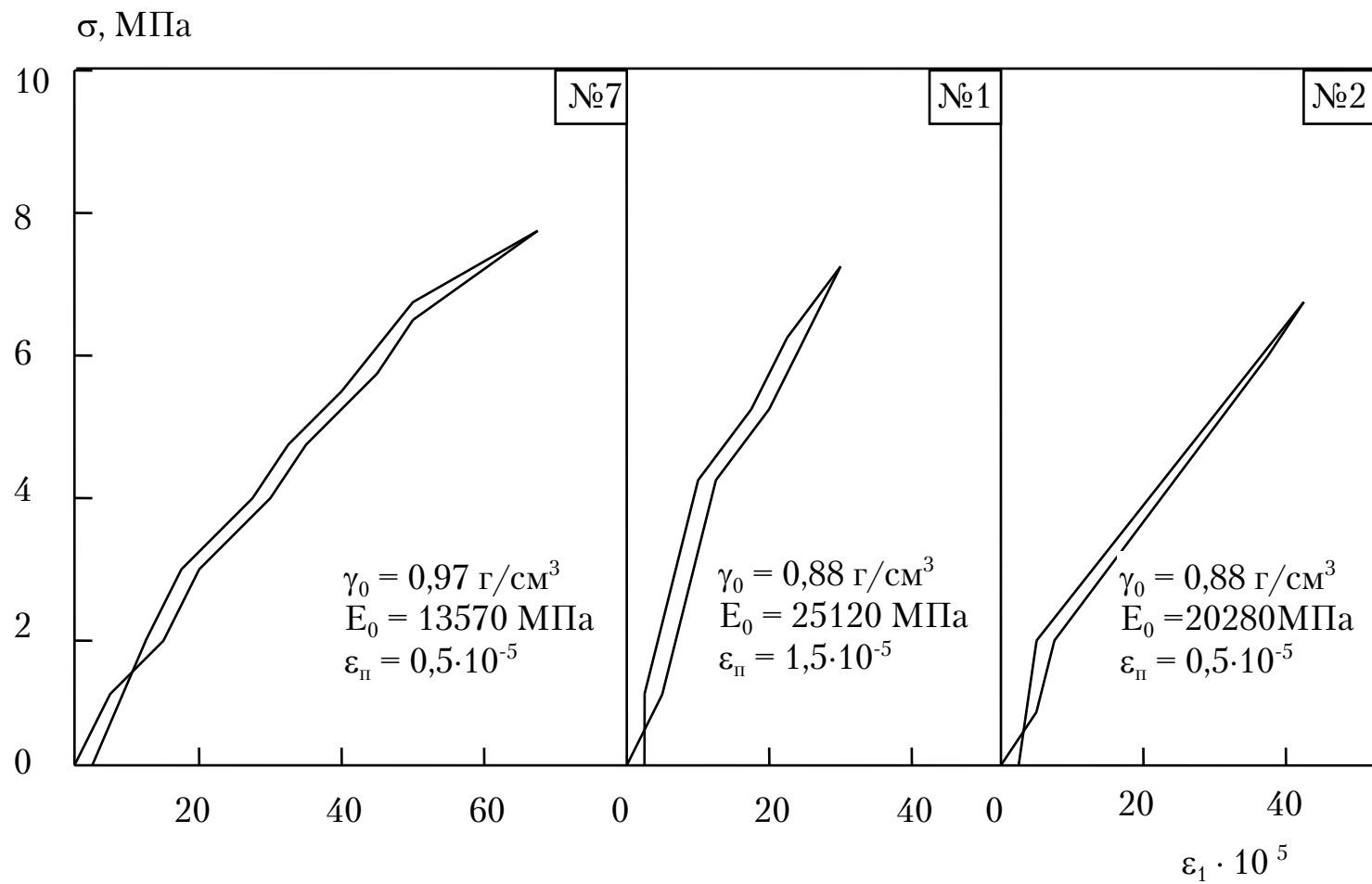


Рис. 69. Деформативность гранул керамзита при их тарировке

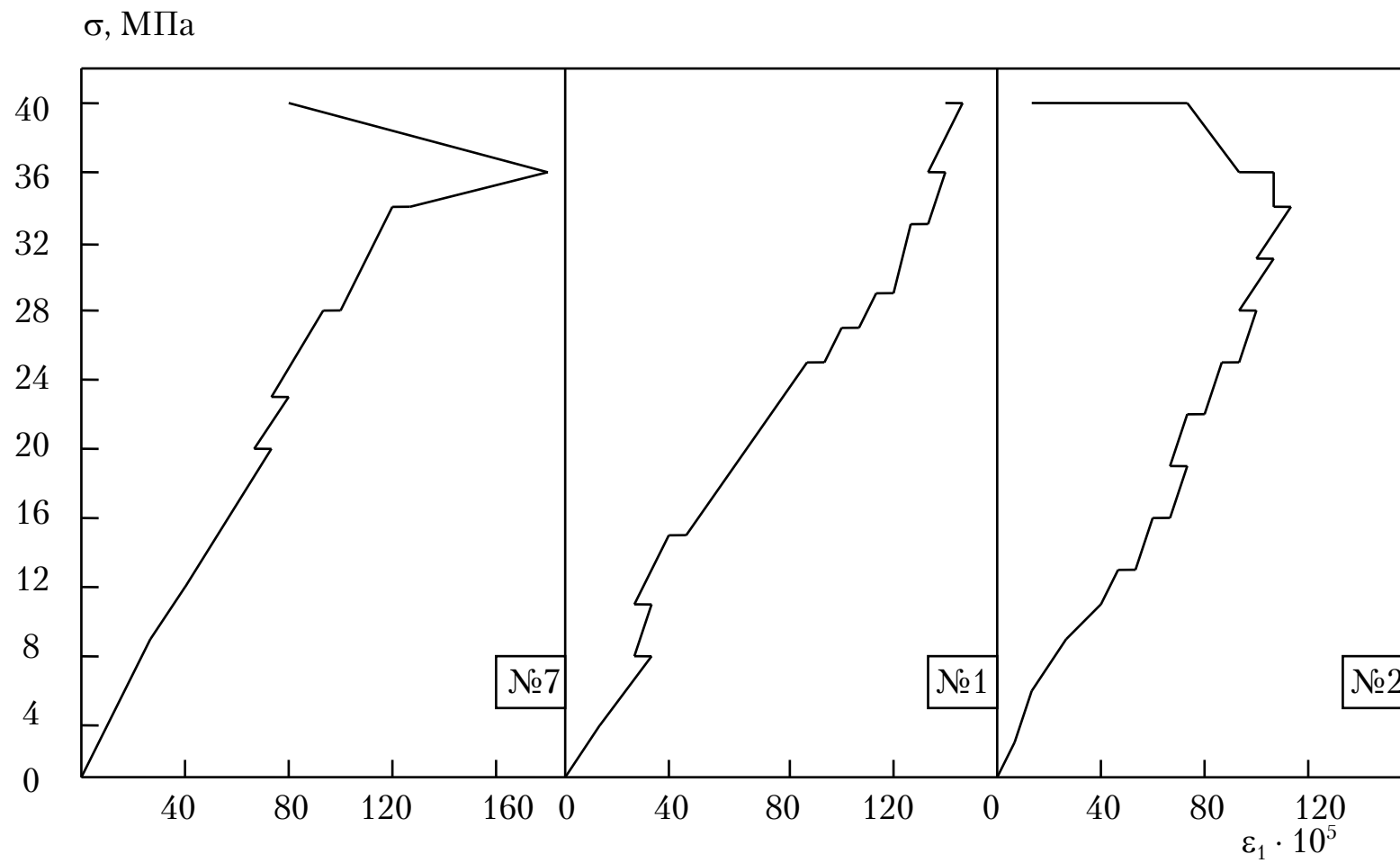


Рис. 70. Деформация гранул керамзита в модели бетона

На рис. 70 приведены графики деформирования трех зерен керамзита на кривой нагружения модели бетона. Из графиков рис. 70 следует, что гранула №7 с  $E_0=13570$  МПа начала участвовать в перераспределении напряжений в модели бетона с напряжения 23 МПа, показала наибольшую деформацию в модели (1,78 мм/м) и при уровне напряжения 36 МПа утратила свою несущую способность. Гранула №25 с  $E_0=20280$  МПа начала участвовать в распределении перенапряжений в модели бетона с напряжения 13,8 МПа, показала наименьшую деформацию в модели (1,14 мм/м), начала терять несущую способность при 36 МПа, утратив ее полностью при напряжении 40 МПа. Гранула №19 с  $E_0=25120$  МПа, т.е. с большим значением модуля упругости, чем у матрицы, начала участвовать в перераспределении напряжений в модели бетона с уровня напряжений в 8,8 МПа и начала терять свою несущую способность в модели бетона с уровня напряжения 40 МПа.

Из анализа напряженно-деформированного состояния характерных зон поля деформации модели бетона (рис. 68) следует, что наибольшие деформации растяжения характерны для зон “1”, “5”, “10” и “9”. Однако, по сравнению с моделями, рассмотренными выше, поле деформаций этой модели на всех уровнях нагружения более однородно.

На рис. 71 показан характер развития макротрещин и разрушения модели бетона, из которого следует, что макроскопические трещины разрушения прошли как бы сверху вниз с обеих сторон гранул №25 и №19 по зоне контакта с выходом на гранулу №7 и боковые поверхности модели. Трещина разрушения в виде дуги прошла и по верхней грануле №25, показавшей наименьшую деформативность в модели (рис. 70).

На рис. 72 показано деформированное состояние характерных зон деформационного поля модели бетона с шестью тарированными гранулами керамзита.

На рис. 73 приведены кривые  $\sigma = f(\varepsilon)$  деформационного тарирования зерен керамзита в линейном напряженном состоянии осевого сжатия, а также плотность и модуль упругости гранул. Максимальные напряжения при тарировке гранул составляли  $0,5...0,6 R_{сж}$ . Оттарированные гранулы использовали для изготовления модели бетона. На рис. 72 видна схема расположения тарированных гранул в модели бетона. Цементно-песчаная матрица модели характеризовалась прочностью на сжатие 39 МПа, начальным модулем упругости 16000 МПа и коэффициентом Пуассона, равным 0,17. При уровне загрузки  $0,9 R_{сж}$  матричный материал показал сжимаемость 2,8 мм/м, а

поперечное расширение – 0,75 мм/м. Предельная сжимаемость матричного материала составляла 3,9 мм/м. Из сравнения деформативных свойств зерен керамзита и матрицы следует, что в модели бетона с шестью гранулами имели место все возможные варианты сочетания  $E_B$  и  $E_M$ , встречающиеся в конструкционном керамзитобетоне.

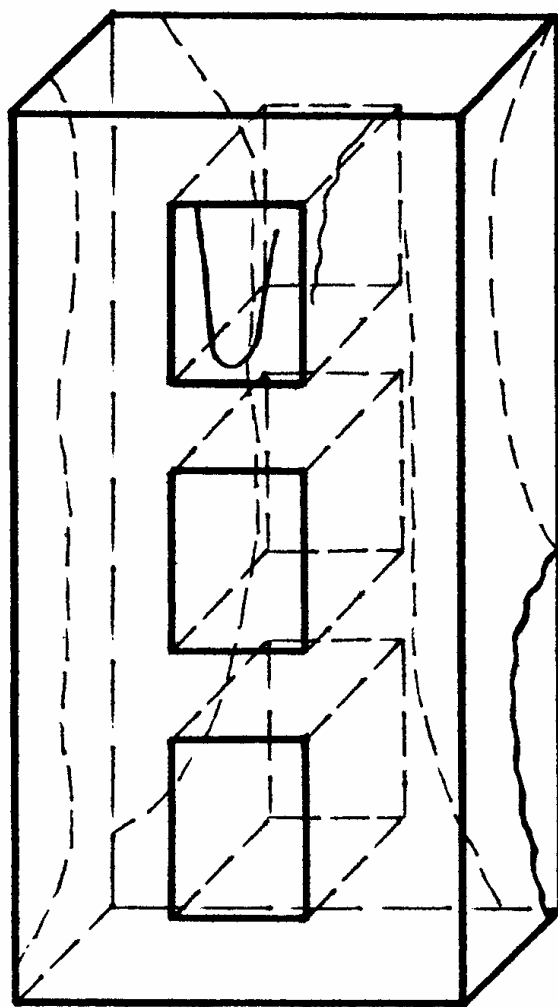


Рис. 71. Характер роста макротрещин при разрушении модели бетона с тремя гранулами керамзита:  
——— — макротрещины с лицевой стороны модели;  
----- — то же, с тыльной стороны



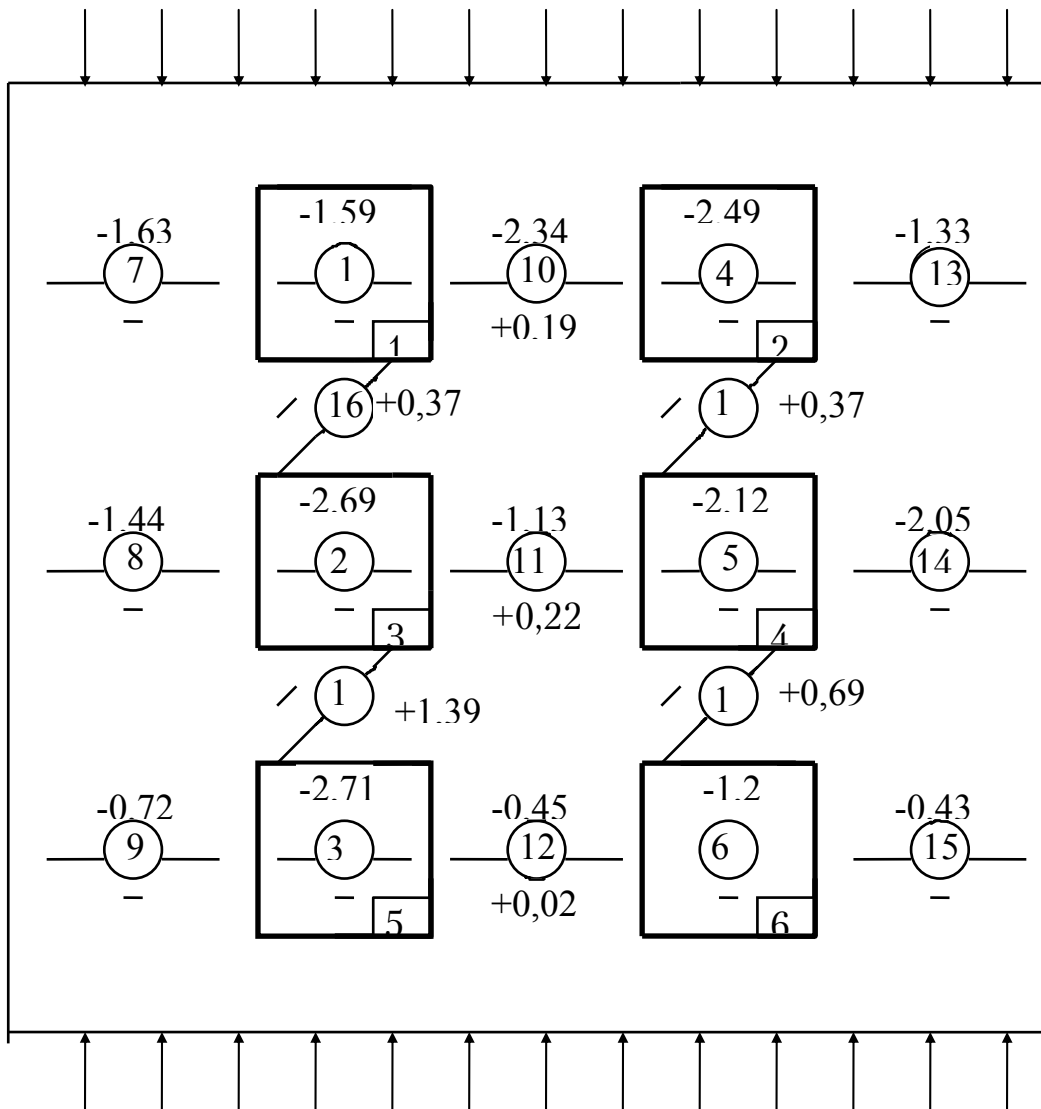


Рис. 72. Деформированное состояние характерных зон модели бетона с шестью тарированными гранулами керамзита при  $\sigma=0,91R_{сж}$ :

○ – характерные зоны;

□ – номера гранул;

“-“ – деформация сжатия в мм/м (числитель);

“+” – деформация растяжения в мм/м (знаменатель);

$$R_{сж}^{PM} = 40,1 \text{ МПа} \quad R_{сж}^{KM} = 33,0 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_1^{PM} = 3,52 \text{ мм/м} \quad \varepsilon_1^{KM} = 1,72 \text{ мм/м}$$

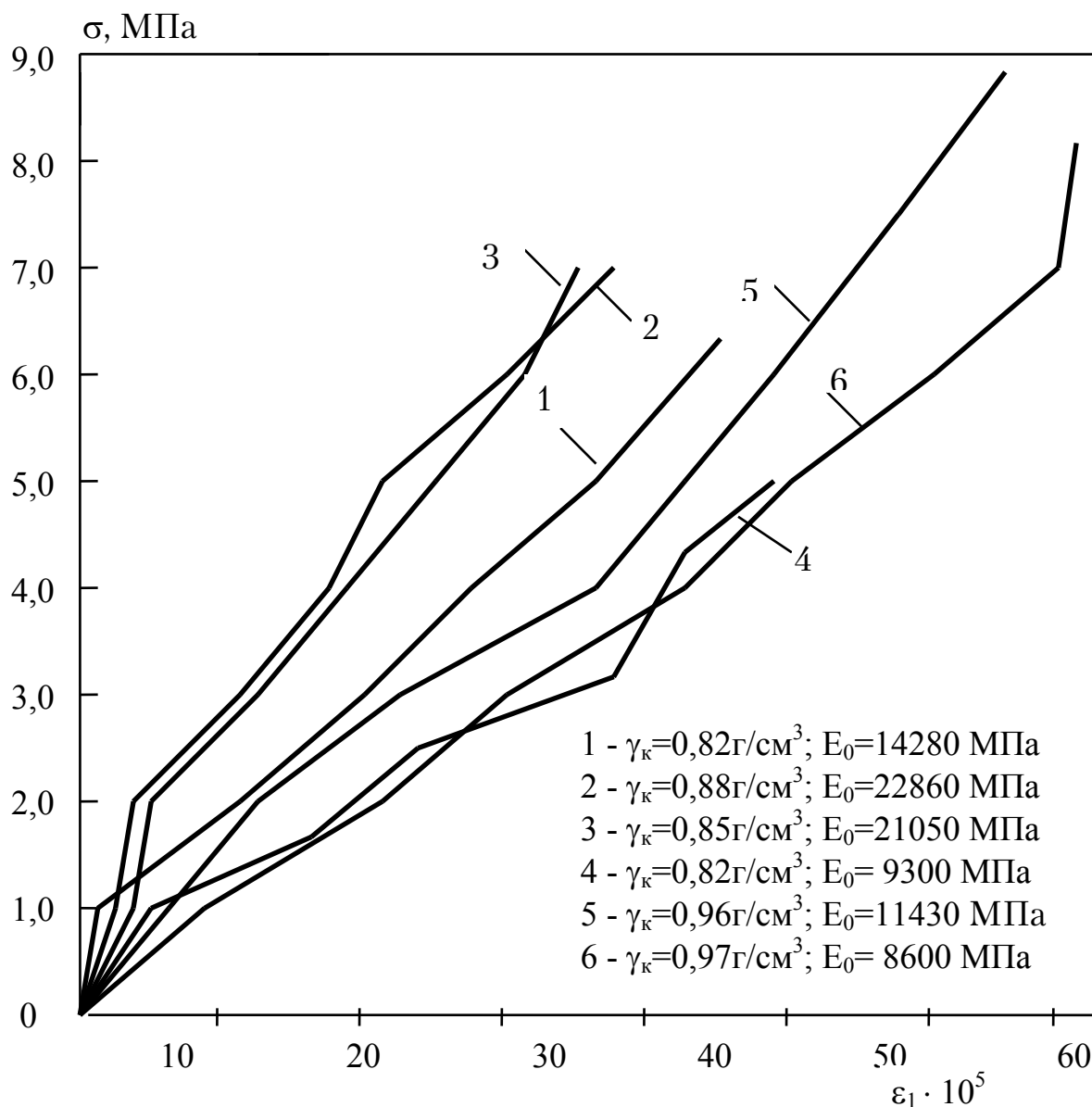


Рис. 73 Деформативность гранул керамзита при их тарировке:  
1...6 – номера гранул

На рис. 74 приведены деформации гранул керамзита на кривой нагружения структурной модели бетона. Из графиков рис. 74 виден как характер участия каждой гранулы в механической работе модели бетона, так и уровень напряжений, соответствующий потере несущей способности зерен керамзита. Из анализа деформационных кривых

(рис. 74) следует важный вывод о том, что по характеру наклона и сближения кривых видно, что происходит выравнивание значений модуля деформаций зерен керамзита с повышением интенсивности напряжения, что, вероятно, обусловлено стеснением деформаций и обжатием зерен, находящихся в матричном материале. Это обстоятельство, безусловно, будет способствовать выравниванию и повышению однородности поля деформаций модели бетона.

Из графиков рис. 74 видно, что при выдержке на ступенях нагружения происходит перераспределение напряжений между структурными элементами модели, причем определенной закономерности в перераспределении напряжений с ростом уровня  $\sigma/R$  не наблюдалось, что говорит о беспрерывно меняющемся поле напряжений вокруг каждого зерна заполнителя, что, в свою очередь, обусловлено различным характером изменения модуля деформаций этих зерен керамзита с ростом значения  $\sigma/R$  в соответствии с данными, приведенными на рис. 56.

Анализ последовательности разрушения гранул керамзита и характера разрушения модели показывает, что в первую очередь теряли несущую способность зерна керамзита, обладавшие меньшими значениями константы упругости. Характер перераспределения деформаций в структурной модели на этапах нагружения позволяет считать, что независимо от деформационных свойств зерен керамзита они вплоть до разрушения оказывают непосредственное влияние на поле напряжений (деформаций) матричной составляющей модели и способствуют повышению однородности деформационного поля модели бетона.

По картине зафиксированных на модели макротрещин разрушения (рис. 75) следует, что разрушение модели бетона с шестью гранулами керамзита проходило как по заполнителю, так и растворной составляющей модели.

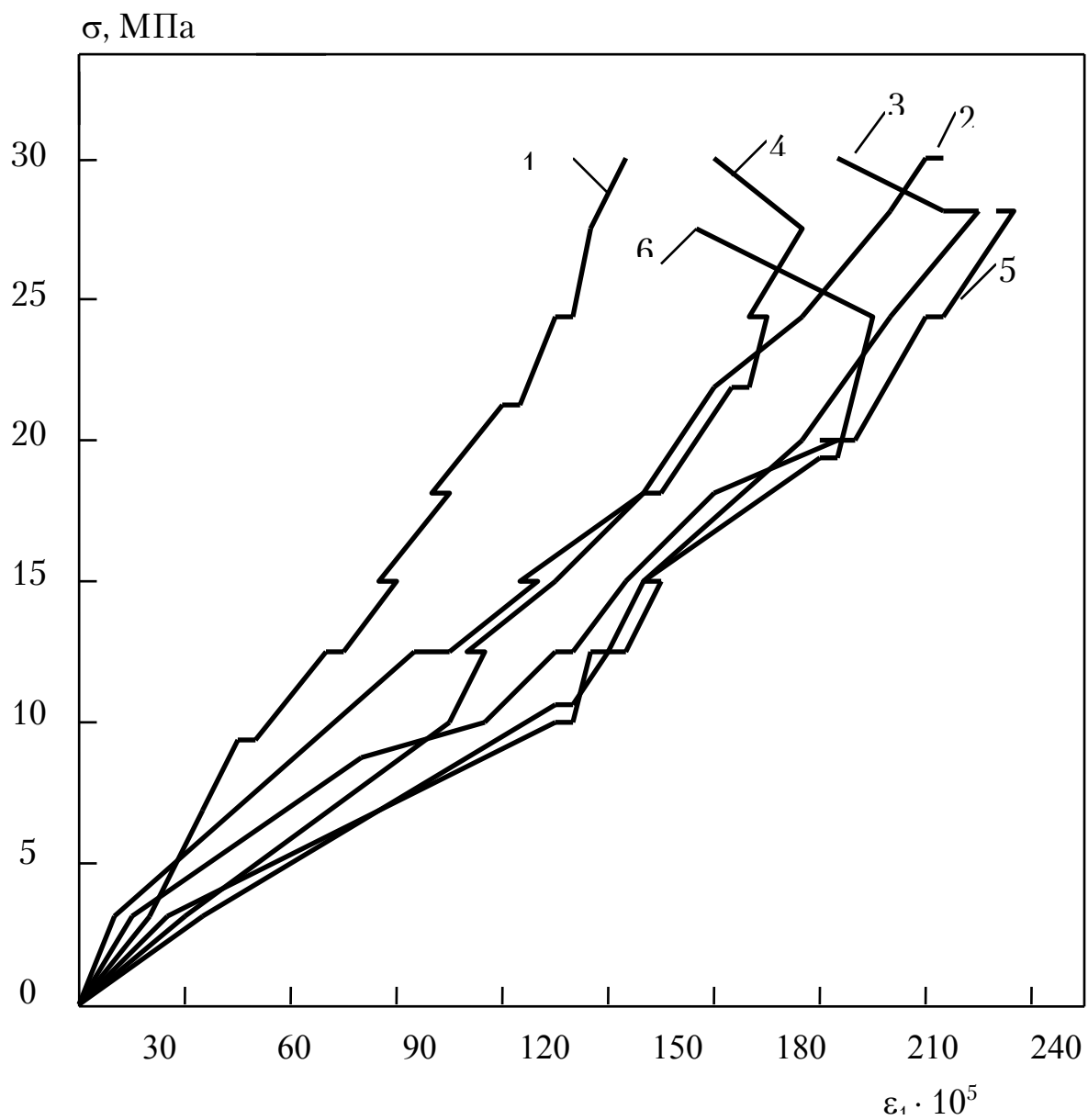


Рис. 74. Деформативность гранул керамзита при осевом сжатии модели бетона:  
1...6 – номера гранул

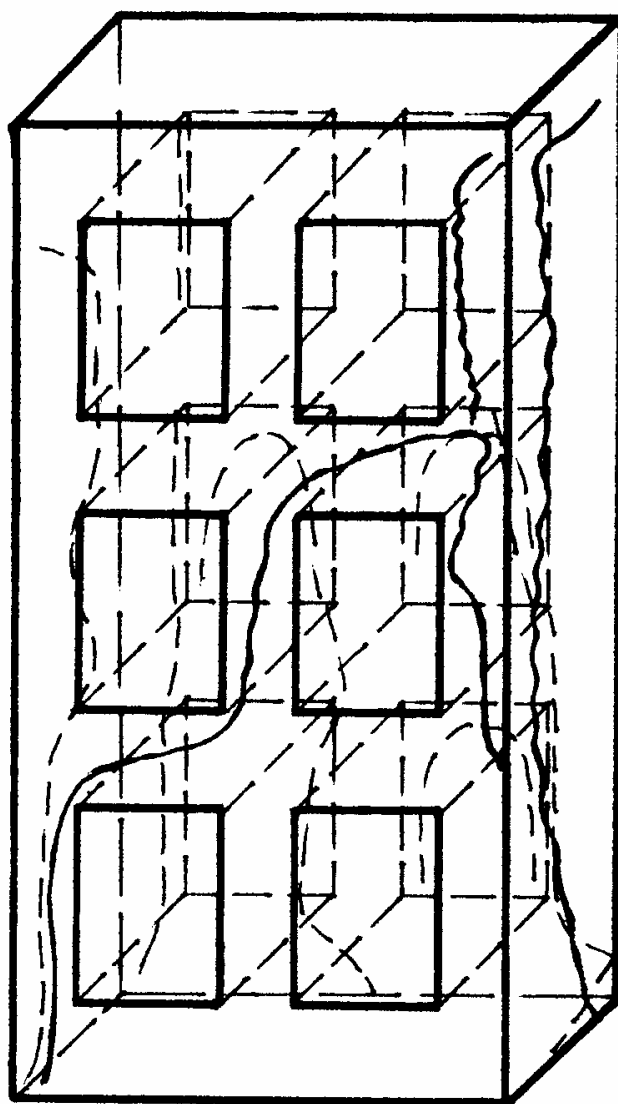


Рис. 75. Характер роста макротрещин при разрушении модели бетона с шестью гранулами керамзита:

————— — макротрещины с лицевой стороны модели;  
----- — то же, с тыльной стороны

Таким образом, оценка механических свойств структуры бетона по свойствам его материального цикла с соответствующими параметрами ( $E_B/E_M$ , сила сцепления, объемное содержание и размер заполнителя) подтверждает возможность исследования по рассматриваемому способу напряженного состояния структуры бетона на моделях. Нами впервые в исследовательской практике были использованы предварительно тарированные элементы модели легкого бетона для анализа

напряженного состояния характерных зон деформационного поля модели.

#### 5.4. Механическое поведение керамзитобетона при кратковременном нагружении

Современный зарубежный и отечественный опыт комплексного использования легких бетонов на пористых заполнителях типа керамзита при строительстве особенно высотных зданий обеспечивает заметное снижение материалоемкости и затрат на фундаменты, дает экономию арматуры и снижает стоимость строительства на 13...15 %.

Однако, механическое поведение конструкционного керамзитобетона как при кратковременном, так и длительном приложении внешней нагрузки все еще остается изучено не в полной мере. Дальнейшее изучение поведения керамзитобетона конструкционного назначения под нагрузкой будет способствовать более достоверному определению напряженно-деформированного состояния конструкций, а, следовательно, и более рациональному их проектированию.

На основе экспериментальных данных, полученных как отечественными, так и зарубежными исследователями, в работе [116] отмечено, что на пористых заполнителях с различной плотностью могут быть получены одинаковые прочностные свойства легкого бетона с резко отличным модулем упругости. Эти данные позволяют утверждать, что модуль упругости легкого бетона в значительной мере зависит от деформативности пористого заполнителя.

Исходя из этого, дальнейшее всестороннее изучение физико-механических свойств отдельных зерен крупных пористых заполнителей позволит разработать более четкие физические представления о процессах деформирования и разрушения легкого бетона под нагрузкой, и на этой основе решить ряд практических задач.

Основная цель выполненной авторами работы – расширить ранее сформулированные взгляды на закономерности прочностных и деформативных свойств заполнителей, исходя из особенностей их строения и степени пористости, и интерпретируя на этой основе диаграмму сжатия керамзитобетона и процесс его ползучести.

При оценке физико-механических свойств зерен керамзита при осевом сжатии результаты измерений в значительной степени определяются методикой подготовки образца и проведения испытания. В наших опытах мы использовали образцы-призмы правильной

геометрической формы, которые получали путем обтачивания керамзитовых гранул. Это позволяло вести их испытание по физической оси вплоть до разрушающей нагрузки, тогда как любой другой прием подготовки образца не удовлетворяет этому условию, что, в свою очередь, не позволяет четко изучить физический процесс развития деформаций керамзитового образца с ростом уровня напряжений, и проанализировать интересующие нас взаимосвязи. Применение подобных образцов, полученных из пористого ядра гранул керамзита, позволяет также провести сравнительную оценку деформативных свойств пористой структуры заполнителей, различных по происхождению и первоначальной форме. Испытание образцов на сжатие проводили с применением динамометров сжатия типа ДОСМ. Деформативность замеряли тензометрическим способом, для чего на грани образцов наклеивали тензодатчики омического сопротивления.

В опытах был использован керамзитовый гравий никольского, октябрьского и пензенского заводов с плотностью в куске от 0,4 до 1,0 г/см<sup>3</sup>. Известно, что зерна керамзита имеют разное строение в зависимости от исходного глинистого сырья и режима его вспучивания. В работе [117] показано, что модуль упругости обжиговой корки превышает модуль упругости зерна керамзита в несколько раз. Отсюда мы полагаем, что толщина обжиговой корки на гранулах будет оказывать существенное влияние на модуль упругости как керамзита, так и бетона на его основе. Определение толщины обжиговой корки гранул исследуемых керамзитов показало, что керамзит никольского завода обладал корочкой толщиной 0,12...0,17 мм, октябрьского – 0,8...1,3 мм, пензенского – 0,5...2,0 мм. При изучении деформативности зерен керамзита закономерно ожидать, что деформативные свойства зерен керамзита со слабо выраженной обжиговой коркой (никольский керамзит), установленные на образцах правильной геометрической формы, будут подобны указанным свойствам его реальных гранул. В то время как для пензенского керамзита такой аналогии, вероятно, провести нельзя.

Ранее на графиках рис. 56, построенных по усредненным данным из испытания 10...12 образцов, показан характер изменения модуля деформации керамзита различной плотности с ростом уровня напряжений. Из графиков рис. 76 видно, что особенность всех кривых  $\sigma = f(\varepsilon)$  для керамзита испытанных плотностей состоит в том, что они отражают рост величины модуля деформации с увеличением напряжений практически до уровня  $0,6...0,7R_{\text{пр}}$ , а иногда и более. Подобная связь между напряжениями и деформациями, но в менее

выраженной форме, была ранее установлена нами на аглопоритовых образцах. М.З. Симонов [5] приводит сведения о неизменности модулей упругости туфов арктического и ереванского типа при напряжениях в интервале от 0 до  $R_{сж}$ .

На основе никольского керамзита изготавливали бетон условной марки 300, на основе пензенского – 200. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона условной марки 300 составлял: цемента – 450 кг, керамзитового гравия – 530 кг, кварцевого песка – 650 кг и воды – 170 л. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона условной марки 200 составлял: цемента – 429 кг, керамзитового гравия – 510 кг, кварцевого песка – 825 кг и воды – 229 л. Образцы формовали при стандартных параметрах вибрации с использованием пригруза 0,005 МПа.

В возрасте 38...46 суток часть образцов на основе никольского керамзита была загружена на длительное осевое сжатие с интенсивностью сжатия  $0,4 R_{пр}$  и  $0,6 R_{пр}$ . Спустя 600 суток эти образцы были разгружены. В дальнейшем образцы, подвергавшиеся длительному действию осевой сжимающей нагрузки, для краткости мы будем называть рабочими.

Изучение диаграмм сжатия и характера разрушения контрольных и рабочих образцов-призм проводили в возрасте 28...38 и 645...980 суток. Призмы размером 10×10×40 см испытывали путем приложения кратковременной статической осевой сжимающей нагрузки. Нагрузку прикладывали ступенями в 0,1 ожидаемой призмной прочности вплоть до разрушения. Структурные изменения бетона под нагрузкой контролировали измерением продольных и поперечных деформаций. На основе обработанных экспериментальных данных установлены определенные взаимосвязи, представленные на рис. 76...78.

На рис. 76 и 77 представлены кривые изменения модуля деформации керамзитобетона, полученные на контрольных образцах, в зависимости от уровня напряжений с учетом пластических деформаций, протекающих при центрировании образцов. Как видно из графиков рис. 76, модуль деформации бетона на основе никольского керамзита растет с увеличением интенсивности напряжений до уровня  $0,7...0,8 R_{пр}$ . Модуль же деформации бетона на пензенском керамзите, как следует из графиков рис. 77, напротив, уменьшается с ростом уровня напряжений.



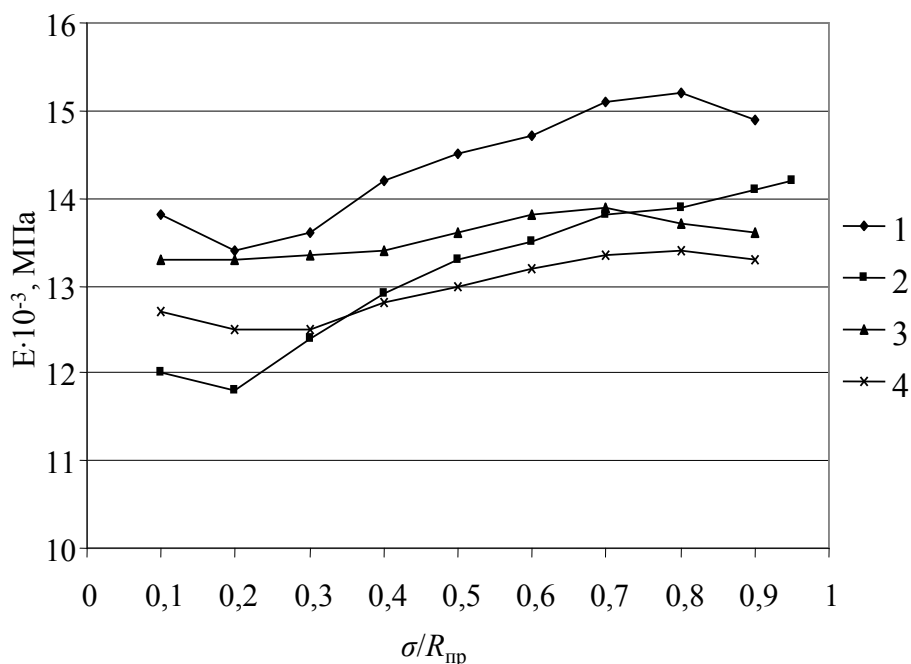


Рис. 76. Характер изменения модуля деформации конструкционного керамзитобетона серии Н (контрольные образцы) с ростом уровня напряжения: 1 –  $R_{пр}=31$  МПа; 2 –  $R_{пр}=27$  МПа; 3 –  $R_{пр}=28,5$  МПа; 4 –  $R_{пр}=33$  МПа

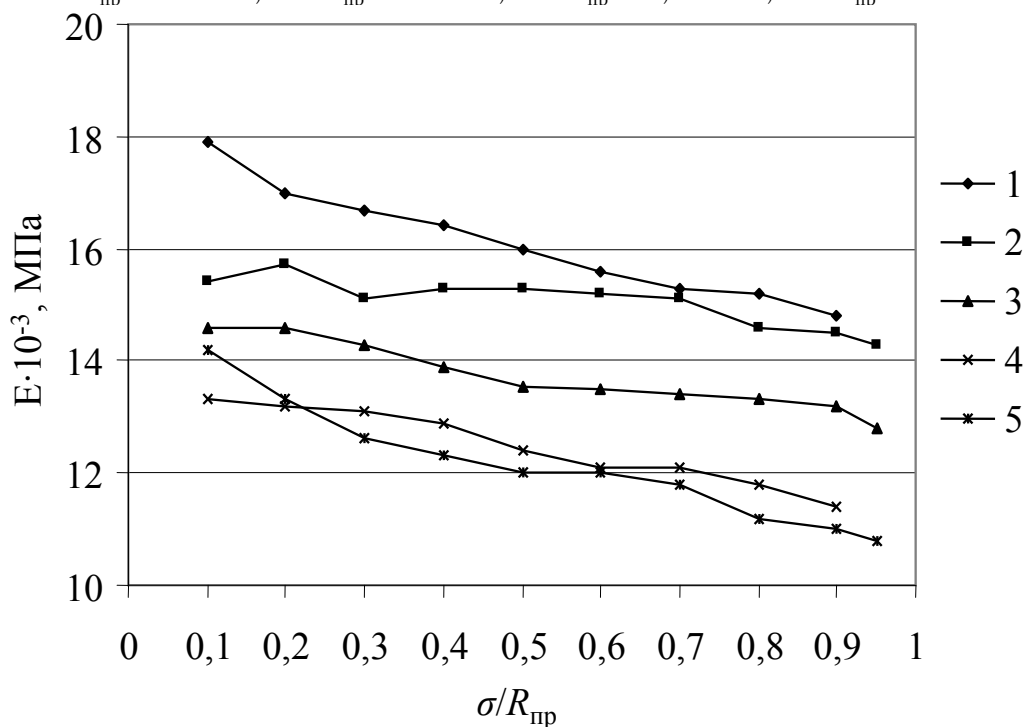


Рис. 77. Характер изменения модуля деформации конструктивного керамзитобетона серии II (контрольные образцы) с ростом уровня напряжения: 1 –  $R_{пр}=26$  МПа; 2 –  $R_{пр}=20$  МПа; 3 –  $R_{пр}=22$  МПа; 4 –  $R_{пр}=21$  МПа; 5 –  $R_{пр}=18$  МПа

Эти опытные данные позволяют говорить о том, что диаграмма сжатия конструкционного керамзитобетона может иметь различный

характер. Подтверждением этому положению могут служить и экспериментальные результаты А.А. Кудрявцева [118].

Общепризнано, что керамзитобетон является упруго-пластическим материалом. Однако, как это видно из приведенных экспериментальных данных, проявление упругих и пластических деформаций, наблюдаемых на диаграмме  $\sigma = f(\varepsilon)$ , может иметь различную последовательность и интенсивность. Мы полагаем, что это обусловлено деформативными особенностями керамзитового гравия, имеющего разное строение.

На рис. 78 представлены графические зависимости изменения модуля деформации на кривой нагружения при кратковременном приложении нагрузки для образцов керамзитобетона на основе никольского керамзита после их испытания на ползучесть в течение 600 суток.

Факт пластических деформаций гранул керамзита при длительно действующей сжимающей нагрузке установлен в работе [119]. Опыты того времени показали, что удельные деформации ползучести гранул керамзита при уровне напряжения осевого сжатия от  $0,37$  до  $0,54R_{сж}$  составляют  $6,7...8,6 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ .

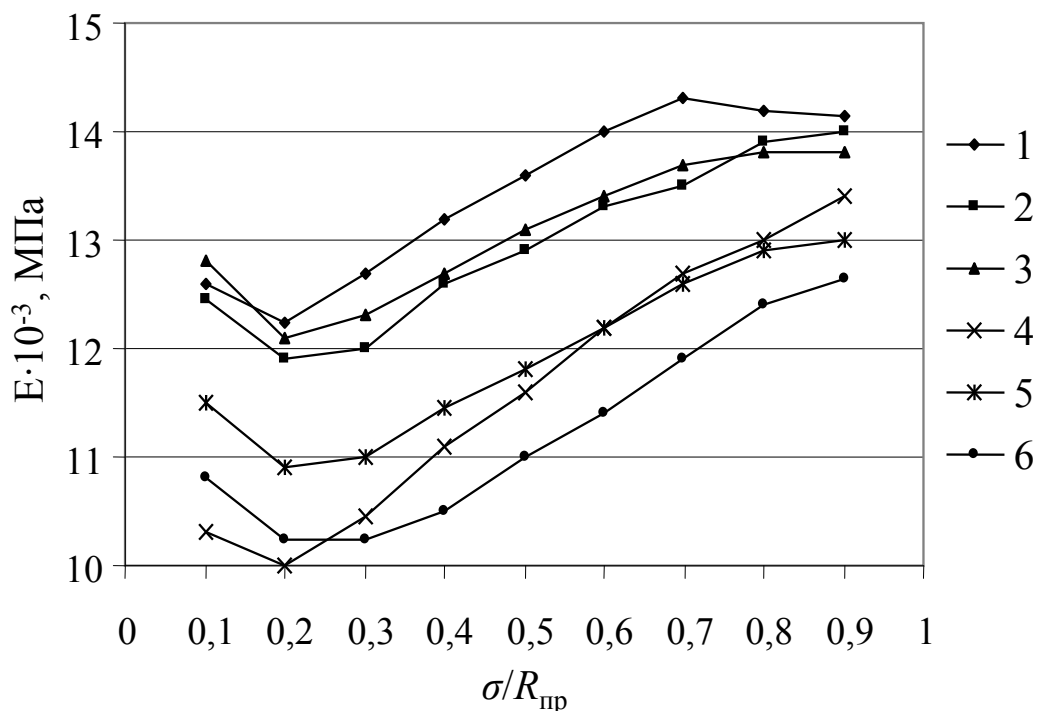


Рис. 78 Характер изменения модуля деформации конструкционного керамзитобетона серии Н (рабочие образцы) с ростом уровня напряжения:  
 1 –  $R_{нр}=37$  МПа; 2 –  $R_{нр}=28$  МПа; 3 –  $R_{нр}=32,9$  МПа;  
 4 –  $R_{нр}=31,6$  МПа; 5 –  $R_{нр}=33$  МПа; 6 –  $R_{нр}=29,5$  МПа

При разгрузке наблюдалась хорошая упругость гранул, выражающаяся как в мгновенно-упругих деформациях, так и в деформациях последействия. Поэтому следует признать ползучесть самих гранул одним из факторов, предопределяющих ползучесть керамзитобетона.

В табл. 16 приведены величины удельных деформаций ползучести за 600 суток неизолированных от высыхания образцов бетона из никольского керамзита в зависимости от относительного уровня обжатия.

Т а б л и ц а 16

Шифр образца	Призменная прочность, МПа	Уровень обжатия $\sigma/R_{пр}$	$C \cdot 10^5$ , МПа <sup>-1</sup>	Характеристика деформативности на уровне обжатия, $E/R_{пр}$
11	37,0	0,32	7,1	341
12	32,9	0,38	7,3	375
13	33,0	0,55	9,3	376
10	31,6	0,58	9,2	386
14	29,5	0,62	8,7	400
9	28,0	0,64	6,6	476

Из данных табл. 16 следует, что степень обжатия образцов не оказывала определяющего значения на величину удельной деформации ползучести. В связи с этим нами используется дополнительная характеристика деформативности, представляющая собой отношение модуля деформации (при данном уровне обжатия) к призменной прочности. С повышением интенсивности обжатия с 0,32 до 0,55 $R_{пр}$  характеристика деформативности бетона изменяется незначительно, а именно в пределах 341...376, в связи с чем удельные деформации ползучести возрастают в зависимости от степени обжатия. Дальнейшее повышение обжатия керамзитобетона до 0,64 $R_{пр}$  сопровождалось существенным ростом его характеристики деформативности до величины 476. Увеличение упругости керамзитобетона с ростом интенсивности обжатия закономерно приводит к уменьшению значения удельных деформаций ползучести, как это видно из данных таблицы.

Таким образом, изучение деформаций ползучести конструктивного бетона на основе никольского керамзита подтвердило зависимость удельных деформаций ползучести от характера и интенсивности изменения модуля деформации керамзитобетона по мере его нагружения.

При сравнении рис. 76 и 78 видно, что последовательность изменения модуля деформаций контрольных и рабочих призм идентична. Что касается интенсивности изменения, то более интенсивный рост модуля деформации с увеличением степени обжата наблюдался у рабочих образцов. Этим подтверждается влияние деформативных свойств керамзитового гравия на деформативность бетона рабочих образцов. При разгрузке рабочих образцов нами отмечено, что упруго-мгновенные деформации, наблюдаемые при снятии длительно действующей нагрузки, существенно превышают упруго-мгновенные деформации загрузки образца. Эта особенность обратимости деформаций керамзитобетона по сравнению с бетонами на плотных заполнителях, характеризующихся лишь частичной обратимостью упруго-мгновенных деформаций загрузки, рассмотрена нами в работе [120] и объясняется в основном деформативными особенностями и весьма хорошей упругостью зерен керамзита.

На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Особенностью диаграммы сжатия гранул керамзита является характерная выпуклость к оси деформаций, наблюдаемая до уровня напряжений  $0,6...0,7 R_{пр}$ , что обусловлено строением гранул и, прежде всего, толщиной обжиговой корочки.

2. Вид диаграммы сжатия керамзитобетона предопределяется характером сжатия используемого керамзитового гравия.

3. Исходя из полученного очертания диаграммы сжатия, можно судить о возможных удельных деформациях ползучести керамзитобетона в зависимости от интенсивности его обжата.

4. Учитывая изменяемость очертания диаграммы сжатия конструктивного керамзитобетона, следует более дифференцированно подходить к оценке его деформативных свойств в зависимости от строения керамзитового гравия.

5. Если модуль деформации керамзитобетона растет с повышением уровня напряжений, бетон разрушается очень хрупко. Если же модуль деформации керамзитобетона уменьшается с ростом уровня напряжений или остается постоянным, то разрушение бетона происходит более пластично.

6. Для керамзитобетона, характеризующегося ростом величины модуля деформации с повышением интенсивности обжата, целесообразно как технически, так и экономически расчетный модуль упругости определять при уровне обжата  $0,5...0,6R_{пр}$ .

## 5.5. Механическое поведение термолитобетона при кратковременном нагружении

Проблема заполнителей для производства конструкционных бетонов для строительной практики Пензенской области стоит весьма остро, так как на территории области отсутствуют месторождения пород, пригодных для организации производства плотных (тяжелых) заполнителей. Существующее производство керамзитового гравия не удовлетворяет современным требованиям рыночной экономики из-за отсутствия глинистого сырья высокого качества. В этой связи весьма перспективным местным сырьем для производства искусственного пористого заполнителя для изготовления легких конструкционных бетонов является кремнистая порода (опока), запасы которой на территории области, по данным [121], велики.

Основные физико-механические свойства термолита из опоки, полученные нами, приведены выше в параграфе 5.2.

Для изучения деформационных и прочностных свойств конструкционного термолитобетона, а также для получения опытной партии преднапряженных пустотных и ребристых плит типа ПТК и ПНС в промышленных условиях была изготовлена опытная партия термолитового щебня на основе местной опоки Канаевского месторождения в объеме 15 м<sup>3</sup>.

Обжиг опоки осуществляли на керамзитовой печи при температуре 1070...1100 °С. Термолитовый заполнитель фракции 5...20 мм характеризовался следующими данными: объемная насыпная масса – 770 кг/м<sup>3</sup>; прочность заполнителя в стальном цилиндре диаметром 150 мм была 8,0 МПа; водопоглощение в воде составляло 30 % по массе за 24 часа и 24 % – за 1 минуту; ряд других характеристик заполнителя приведены в табл. 15.

Для изучения деформационных и прочностных свойств термолитобетона были подобраны два состава бетона марки 200, аналогичных по удобоукладываемости бетонной смеси, для изготовления железобетонных конструкций типа ПТК и ПНС, т.е. соответственно с удобоукладываемостью 50...80 с и 4...6 см.

Для изготовления опытных образцов кубов и призм размером 10×10×10 см и 10×10×40 см использовали сульфатостойкий портландцемент марки 400 Вольского завода “Большевик”, сурский речной песок с модулем крупности  $M_{кр}=1,56$  и термолит опытной партии.

Состав бетона 1-й серии по уплотненной бетонной смеси с удобоукладываемостью 50...80 с составил:

цемента – 366 кг/м<sup>3</sup>;  
 песка – 733 кг/м<sup>3</sup>;  
 термолита – 650 кг/м<sup>3</sup> (840 л/м<sup>3</sup>);  
 воды – 273 л (В/Ц=0,746),

а для бетона 2-й серии – с удобоукладываемостью 4...6 см составил:

цемента – 400 кг/м<sup>3</sup>;  
 песка – 640 кг/м<sup>3</sup>;  
 термолита – 665 кг/м<sup>3</sup> (864 л/м<sup>3</sup>);  
 воды – 350 л (В/Ц=0,875).

Образцы формовали на виброплощадке со стандартными параметрами вибрации с использованием пригрузочной площадки 15 гс/см<sup>2</sup>. Время уплотнения бетонной смеси 1-й серии составляло 100...120 с, а 2-й серии – 20...30 с. На каждом составе бетона было изготовлено 30 кубов и 20 призм. Отличительной особенностью легкобетонных смесей на термолите является достаточно быстрое ухудшение ее удобоукладываемости, что обусловлено высоким капиллярным потенциалом термолитового заполнителя. Отформованные образцы подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) в лабораторной пропарочной камере по режиму 3+2+8+естественное остывание при температуре изотермии 80 °С.

После ТВО образцы хранили в обычных лабораторных условиях. В табл. 17 представлены осредненные значения кубиковой прочности и плотности бетона из испытания шести образцов-близнецов.

Т а б л и ц а 17

Состав бетона серии	Возраст бетона					
	После ТВО		28 суток		11 лет	
	$R_k$ , МПа	$\gamma_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_k$ , МПа	$\gamma_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_k$ , МПа	$\gamma_0$ , кг/м <sup>3</sup>
1	18,1	1990	23,6	1930	35,6	1895
2	18,1	1980	22,3	1920	28,5	1880

Как следует из данных табл. 17, кубиковая прочность пропаренного термолитобетона во времени существенно (на 28...50 %) возрастает, что находится в полном соответствии с данными, приведенными в работе [111].

Механические испытания образцов кубов и призм в возрасте 28 суток показали, что отношение призмной прочности к кубиковой было в пределах 0,75...0,8, что находится в пределах значений,

характерных для легких бетонов на других видах пористых заполнителей.

Опытные данные по определению модуля упругости бетона на уровне обжатия  $0,2...0,3R_{пр}$  показали, что значения величин модуля колебались от 13900 до 17800 МПа и, в среднем, были равны 15500 МПа для рассматриваемой марки бетона 200 при его объемной массе в естественном состоянии около  $1930 \text{ кг/м}^3$ . Сравнение значений модуля упругости термолитобетона марки 200 со значениями модуля упругости для легких бетонов по СНиП показало, что модули упругости бетона на основе термолитового заполнителя хорошо согласуются с нормируемыми значениями для легких бетонов типа керамзитобетонов. Характер изменения модуля деформации на кривой нагружения с ростом интенсивности напряжения аналогичен диаграммам для бетонов на плотных заполнителях. Обработка экспериментальных данных позволила установить зависимость между призмочной прочностью и начальным модулем упругости ( $E_0$ ), которая имеет вид

$$R_{пр} = 0,0011E_0. \quad (38)$$

Изучением деформаций на призмах с пятиминутной выдержкой на каждом этапе нагружения установлено, что предельная сжимаемость термолитобетона на уровне обжатия  $0,9...0,95R_{пр}$  находилась в пределах  $1,65...2,8 \text{ мм/м}$ . Предельная растяжимость по поперечным деформациям при этом была в пределах  $0,37...0,83 \text{ мм/м}$ . Коэффициент Пуассона, вычисленный по деформациям на уровне обжатия  $0,2...0,3R_{пр}$ , оказался равным  $0,13$ , что несколько ниже значения  $\nu$  для легких бетонов.

На рис. 79 показан характер механического поведения образцов термолитобетона при первичном нагружении и разгрузке. Из графика рис. 79 видно, что зависимость напряжение – деформация этих бетонов нелинейна и работа деформирования при разгрузке образцов не восстанавливается целиком (заштрихованная область на рис. 79), что свидетельствует о развитии пластических деформаций в структуре материала. При многократном нагружении до уровня обжатия  $0,5...0,6R_{пр}$  и последующей разгрузке, как показали опыты, упругость термолитобетона улучшается.

На рис. 80 приведены основные параметры механического поведения конструкционного термолитобетона с призмочной прочностью в среднем 19 МПа в возрасте 28 суток при кратковременном нагружении до разрушения с пятиминутной выдержкой на каждом этапе

нагружения. Определение структурных и прочностных характеристик бетона проведено в соответствии с методическими рекомендациями [122].

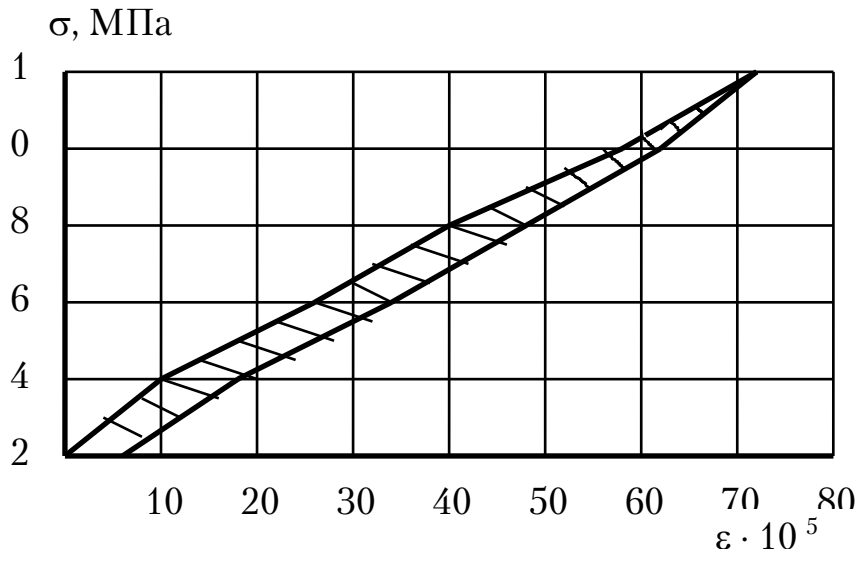


Рис. 79. Характерный вид диаграммы нагрузка-разгрузка термолитобетона

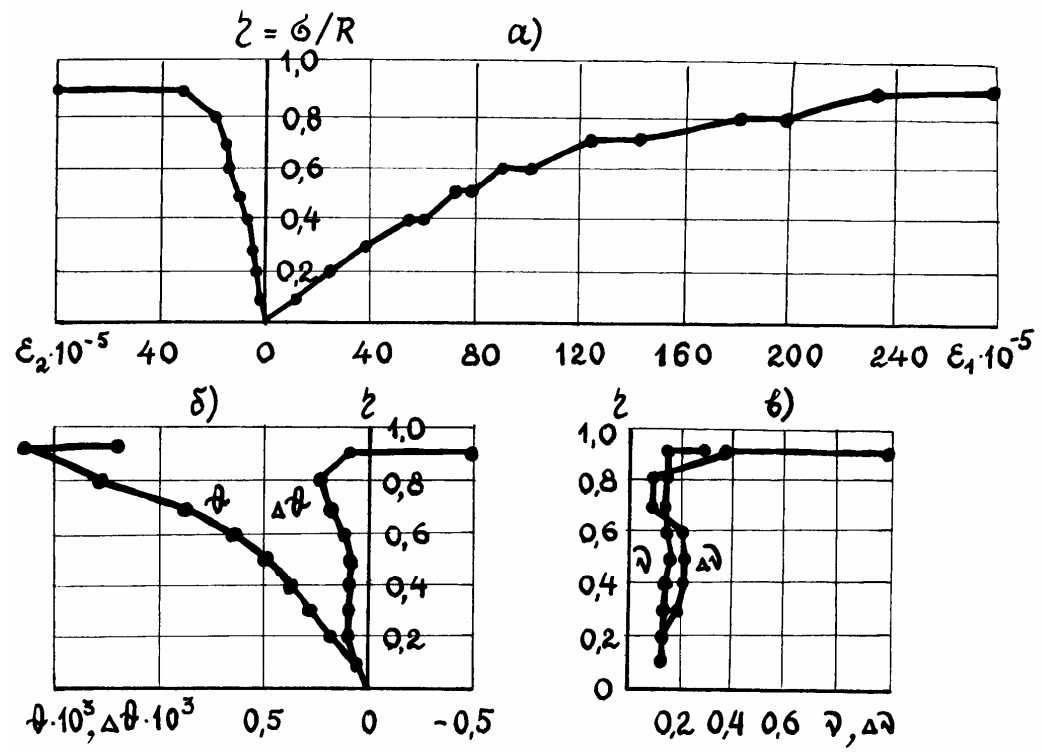


Рис. 80. Графики изменения относительных деформаций (а), относительного объема  $\theta$  или его приращений  $\Delta\theta$  (б), коэффициента Пуассона  $\nu$  или его приращений  $\Delta\nu$  (в) термолитобетона в зависимости от уровня нагружения



Из графиков рис. 80,а хорошо виден характер развития упруго-мгновенных и быстро натекающих деформаций ползучести как продольного сжатия, так и поперечного расширения образцов. Для оценки характера микротрещинообразования термолитобетона при осевом сжатии и, прежде всего, оценки границы прогрессирующего микротрещинообразования  $R_T^v$  построены графики рис. 80,б и 80,в. Параметрическую точку  $R_T^v$  определяли на основании графика объемного относительного изменения бетона при сжатии  $\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$  с ростом нагрузки или графика изменения величины отношения приращения поперечных и приращения продольных деформаций на каждой ступени нагружения  $\Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$ .

Из графиков рис. 80,б и 80,в отчетливо видно, что вторая параметрическая точка  $R_T^v$  расположена на достаточно высоком уровне на кривой нагружения  $\sigma - \varepsilon$  термолитобетона, что характерно для структуры легких конструкционных бетонов на основе пористых заполнителей. Однако, характер диаграммы сжатия  $\sigma - \varepsilon$  термолитобетонов отличается большей выпуклостью в сторону оси напряжений по сравнению с подобными диаграммами легких бетонов типа керамзитобетонов, что, вероятно, обусловлено меньшими значениями модуля деформаций термолита по сравнению с керамзитом, а также малыми значениями коэффициента Пуассона термолита, который, как показали наши опыты, был в пределах 0,077...0,098 на уровне обжатия 0,2...0,3  $R_{пр}$  и 0,128...0,16 на уровне обжатия 0,9...0,95  $R_{пр}$ .

Термолитобетон показал меньшие значения коэффициента упругости и более пластичный характер разрушения призм при осевом сжатии по сравнению с образцами керамзитобетона. Более пластичный характер разрушения термолитобетонов следует считать их определенным преимуществом, так как пластичность материала на микроуровне при создании в его структуре напряженно-деформированного состояния, является важнейшим условием создания надежной конструкции для восприятия внешней нагрузки.

На основании проведенных исследований по изучению прочностных и деформационных свойств конструктивного термолитобетона нами впервые на Пензенском заводе "Стройдеталь" №1 были изготовлены опытные преднапряженные конструкции типа ПТК 59-12 и ПНС-12 на основе термолитобетона марки 200.

В возрасте бетона 28 суток после ТВО плиты испытывали на инвентарном стенде завода с целью определения прочности, жесткости и трещиностойкости. Испытание проведено согласно ГОСТ 8829-94 “Конструкции и изделия бетонные и железобетонные. Методы испытания нагружением и оценки прочности, жесткости и трещиностойкости” и рабочих чертежей, по которым данные плиты запроектированы.

Испытания показали, что предварительно напряженные плиты ПТК и ПНС на основе конструкционного термолитобетона по прочности, жесткости и трещиностойкости удовлетворяли требованиям ГОСТ 8829-94 и проекта.

В связи с тем, что термолитовый заполнитель обладает сильным капиллярным потенциалом по сравнению с керамзитовым гравием, было изучено влияние ряда технологических факторов, и процедуры приготовления легкобетонной смеси на прочность термолитобетона [123].

Для этого было изготовлено четырнадцать серий образцов-кубов размером 10×10×10 см из тех же исходных материалов, характеристика которых приведена выше. Расчетный расход цемента, термолита и речного песка на 1 м<sup>3</sup> бетона марки 200 во всех сериях был принят одинаковым и составлял соответственно в кг: 300; 615 и 750. Фактический расход материалов рассчитывали по уплотненной бетонной смеси. Формование образцов всех серий, кроме состава 13 и 14, осуществляли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрации с использованием пригруза 0,004 МПа (40 гс/см<sup>2</sup>). Все составы бетона через 18 часов после формования подвергали ТВО по режиму: 2+8+естественное остывание. Температура изотермии была 85...90 °С. Плотность и кубиковую прочность бетона при сжатии оценивали на образцах после пропарки и в возрасте 28 и 365 суток. В названные контрольные сроки испытывали по шесть образцов-близнецов в каждой серии.

Ниже изложены технологические особенности приготовления легкобетонных смесей и формования образцов сравниваемых серий, а в табл. 18 приведены осредненные численные значения показателей качества термолитобетона.

Таблица 18

№ состава	В/Ц	Жесткость, с	$R_{сж}$ , МПа/ρ, кг/м <sup>3</sup>		
			после ТВО	28 суток	365 суток
			4	5	6
1	0,7	40	14,0/1940	19,3/1800	22,0/1800
2	0,67	60	13,6/1940	21,1/1790	24,0/1840
3	0,67	50	17,8/1900	21,5/1760	35,0/1850
4	0,676	80	24,5/2040	33,0/1870	35,0/1880
5	0,681	60	23,4/2070	31,8/1910	38,5/1920
6	0,571	50	21,7/2010	22,7/1800	23,5/1770
7	0,592	50	16,2/1920	22,6/1760	29,5/1760
8	0,59	80	31,1/2020	36,5/1900	42,0/1890
9	0,62	60	30,4/2020	40,8/1900	43,4/1890
10	0,662	50	28,3/2000	37,4/1900	39,5/1860
11	0,673	60	9,9/2060	14,3/1760	13,5/1830
12	0,673	60	7,1/1980	13,1/1730	10,0/1710
13	0,840	П-2	9,5/2070	18,0/1940	15,5/1860
14	0,788	П-2	10,7/2030	16,5/1890	19,5/1850

Состав 1. Расход материалов: Ц – 339; В – 237; Щ – 632 и П – 771. Процедура приготовления: сначала перемешали сухие компоненты, затем доливали в две стадии по 0,5 воду затворения.

Состав 2. Расход материалов: Ц – 341; В – 228; Щ – 635 и П – 775. Процедура – аналогично составу 1.

Состав 3. Расход материалов: Ц – 336; В – 225; Щ – 626 и П – 764. Процедура приготовления смеси и формования аналогична составу 1. Повторное вибрирование – через 10 мин в течение 15 с с пригрузом.

Состав 4. Расход материалов: Ц – 349; В – 236; Щ – 651 и П – 794. Процедура приготовления бетона аналогична составу 1. Повторное вибрирование – через 35 мин в течение 20 с с пригрузом.

Состав 5. Расход материалов: Ц – 354; В – 241; Щ – 660 и П – 805. Процедура – аналогично составу 1. Повторное вибрирование – через 25 мин в течение 20 с с пригрузом.

Состав 6. Расход материалов: Ц – 340; В – 194; Щ – 633 и П – 772 и СП С-3 в количестве 0,8% в сухом состоянии от массы цемента. Процедура: сухие компоненты перемешали с 0,5 объемом воды затворения, а затем долили вторую часть воды вместе со всей дозировкой суперпластификатора С-3. Последующая процедура аналогична составу 1.

Состав 7. Расход материалов: Ц – 334; В – 197; Щ – 622 и П – 758 и СП С-3 в количестве 0,8% от массы цемента. Процедура: сухие компоненты перемешали сразу со всем объемом воды затворения и добавкой С-3. Последующая процедура аналогична составу 1.

Состав 8. Расход материалов: Ц – 356; В – 210; Щ – 664 и П – 809 и СП С-3 в количестве 0,8% от массы цемента. Процедура аналогична составу 6.

Состав 9. Расход материалов: Ц – 347; В – 216; Щ – 647 и П – 789 и СП С-3 в количестве 0,8% от массы цемента. Процедура аналогична составу 6.

Состав 10. Расход материалов: Ц – 352; В – 233; Щ – 657 и П – 801 и СП С-3 в количестве 0,8% от массы цемента. Процедура аналогична составу 6. Дополнительно проведено повторное вибрирование через 25 мин после формования образцов в течение 15 с с пригрузом.

Состав 11. Расход материалов: Ц – 352; В – 237; Щ – 657 и П – 801. Процедура смешения компонентов: термолитовый щебень смешали с цементом и долили 0,5 объема воды затворения. Затем добавили мелкий заполнитель и вторую часть воды. Последующая процедура аналогична составу 1.

Состав 12. Расход материалов: Ц – 328; В – 221; Щ – 612 и П – 746. Процедура смешения: цемент затворяли 0,5 объемом воды и полученное цементное тесто смешивали с термолитовым щебнем. Затем добавляли мелкий заполнитель и остаток воды. Последующая процедура приготовления и формования аналогична составу 1.

Состав 13. Расход материалов: Ц – 353; В – 297; Щ – 659 и П – 803. Процедура приготовления бетонной смеси: цемент плюс вода затворения при В/Ц=0,39. Затем термолитовый щебень помещали в воду на одну минуту. Водопоглощение по массе составило 24%. Насыщенный водой термолит смешивали с цементным тестом, а затем добавляли мелкий заполнитель. Бетонная смесь характеризовалась хорошей пластичностью и при формовании образцов уплотнение осуществляли ручным встряхиванием форм.

Состав 14. Расход материалов: Ц – 350; В – 276; Щ – 652 и П – 796. Процедура приготовления бетонной смеси и формование образцов как в составе 13, только насыщение термолита водой осуществляли 10 с и оно составляло по массе 21,4 %.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что значительный капиллярный потенциал термолита приводит к эффективному самовакуумированию легкого бетонной смеси и интенсивному отсосу воды из цементно-песчаной матрицы бетона, что вызывает образо-

вание по всему объему матричной фазы направленной сообщающейся капиллярной пористости, которая в затвердевшем цементном камне служит очагами дефектности его структуры, что выражается в значительном отличии прочности бетона сравниваемых серий.

Как следует из данных, приведенных в табл. 18, весьма эффективным технологическим приемом улучшения прочности термолитобетона является применение добавки суперпластификатора и повторного вибрирования. При этом наилучшие показатели прочности бетона получены из бетонных смесей с жесткостью 60...80 с.

Повторное вибрирование в оптимальные сроки позволяет разрушить направленную капиллярную пористость, улучшить однородность матричной фазы и уменьшить собственные внутренние напряжения в структуре цементного камня, возникающие в результате миграции воды в системе.

## 5.6 Механическое поведение керамзитобетона при циклическом воздействии положительных температур

Как известно, практическая реализация легких бетонов повышенной прочности конструкционного назначения обусловлена не только механическими свойствами и взаимодействием его компонентов, но и изменением свойств бетона от влияния окружающей среды, в частности, сухой жаркой среды. С целью получения этих данных нами были осуществлены соответствующие исследования на керамзитобетоне марок 250 и 300 [124, 125].

Материалами для изготовления бетона служили портландцемент Вольского завода “Большевик” активностью 40 МПа, сурский речной песок с модулем крупности 1,7, керамзитовый гравий Пензенского завода КПД фракции 5...20 мм с прочностью в цилиндре 2,2 МПа и объемной насыпной массой 690 кг/м<sup>3</sup>. Состав бетонной смеси по массе (цемент:песок:керамзит:вода) соответственно для бетона марок 250 и 300 был 437:819:520:229 и 620:539:520:258. Коэффициент насыщения керамзитом составлял 0,44. Подвижность бетонной смеси в обоих составах составляла – 10...15 с.

Опытные образцы кубы размером 10×10×10 см и призмы 10×10×40 см формовали на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрации с пригрузом 0,005 МПа. После термовлажностной обработки образцы хранили в обычных лабораторных условиях.

В возрасте 28 суток определили прочностные, деформативные и структурные характеристики бетонов обеих марок. Затем образцы разделили поровну на контрольные и рабочие. Контрольные образцы хранили в обычных условиях, а рабочие – подвергали ежесуточному воздействию положительных температур (8...9 часов нагревания при 65...70 °С) с последующим остыванием в сушильном шкафу. Интенсивность подъема температуры в шкафу – 60 °С в час. Таким образом, рабочие образцы подвергали 480 циклам теплосмен.

В контрольные сроки 28 и 745 суток на каждом составе бетона испытывали по 6 призм и 10 кубов. Осредненные результаты исследований приведены в табл. 19 и на рис. 81.

Стойкость керамзитобетона к циклическому воздействию положительных температур оценивали по коэффициенту термостойкости [126], изменению прочностных, деформационных и структурных характеристик [122], а также по удельной работе разрушения образцов с применением тензометрического и ультразвукового методов исследования.

Из табл. 19 видно, что коэффициент термостойкости по кубиковой прочности и по прочности на растяжение при раскалывании для керамзитобетона марки 250 практически равен единице и для бетона марки 300 несколько больше единицы. Большие значения названного коэффициента, по нашему мнению, обусловлены позитивным влиянием обжатия керамзитового гравия более упругой матрицей из цементного раствора при ее термоусадочных деформациях. Визуальный осмотр показал, что на поверхностях образцов как контрольных, так и рабочих, после 480 циклов теплосмен отсутствуют видимые невооруженным глазом микротрещины.

Из приведенных в табл. 19 значений величин призмной прочности и начального модуля упругости видно, что возраст и циклическое воздействие теплосмен оказали более негативное влияние на структуру керамзитобетона, изготовленного с повышенным расходом цемента.

На рис. 81 показаны результаты исследований изменения модуля деформаций бетона. Кривые 2 и 2', а также 3 и 3' рисунка построены по деформациям образцов, испытанных до разрушения после их предварительного однократного нагружения до уровня  $0,5...0,6 R_{пр}$ . По остаточным деформациям предварительного нагружения вычисляли коэффициент Пуассона.

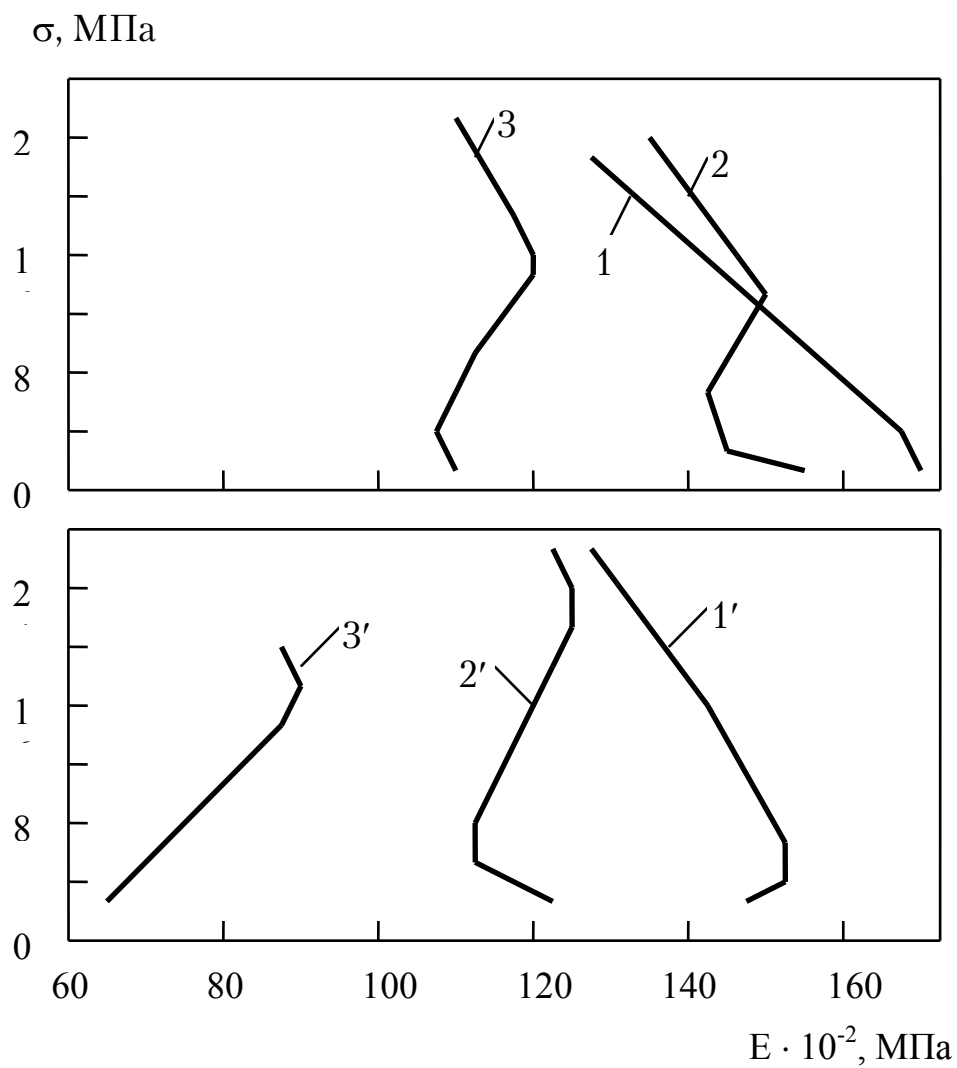


Рис. 81. Изменение модуля деформаций керамзитобетона с ростом уровня напряжения:  
 1 и 1' – соответственно керамзитобетон марок 250 и 300 в возрасте 28 суток;  
 2 и 2' – в возрасте 745 суток контрольные образцы;  
 3 и 3' – после 480 циклов теплосмен рабочие образцы

Таблица 19

Физико-механические характеристики керамзитобетона	Бетон марки 250			Бетон марки 300		
	Контрольные образцы		Рабочие	Контрольные образцы		Рабочие
	Возраст образцов в сутках			Возраст образцов в сутках		
	28	745	745	28	745	745
Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	1845	1810	1740	1830	1780	1745
Влажность по массе, %	-	3,2	1,1	-	4,1	0,8
Кубиковая прочность, МПа	25	25,3	24,6	29,4	27,1	28,8
Коэффициент термостойкости по кубиковой прочности	-	1	0,97	-	1	1,06
Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	1,95	2,19	2,15	1,95	2,15	2,42
Коэффициент термостойкости по прочности на раскалывание	-	1	0,98	-	1	1,12
Призменная прочность, МПа	21	21,2	24,2	24,8	27	22,2
Начальный модуль упругости, МПа	17110	14720	11410	15390	11930	7430
Коэффициент Пуассона	0,18	0,27	0,28	0,23	0,27	0,23
Коэффициент Пуассона по остаточным деформациям	-	0,87	1,29	-	1,4	1,8
Уровень параметрической точки $R_r^v$	0,82	0,75	0,67	0,92	0,7	0,67
Скорость ультразвукового импульса, м/с	-	2958	2551	-	2960	2569
Удельная работа разрушения ( $1/2R_{пр} \cdot \epsilon_{сж}$ ), Дж/м <sup>3</sup>	17220	18020	28314	23560	32132	28860
Удельная работа разрушения на 1 кг цемента	39,4	41,2	64,8	34,6	47,2	42,4



Сравнивая значения величин коэффициента Пуассона по остаточным деформациям контрольных и рабочих образцов бетона марок 250 и 300, приведенных в табл. 19, можно видеть, что их значения превышают значения коэффициента контрольных образцов соответственно на 48 и 29 %. Изменения в структуре бетона при начальном нагружении и разгрузке фиксируются и по изменению времени (скорости) прохождения ультразвукового импульса через образец. Нагрузка образцов до указанного уровня приводила к уменьшению времени прохождения импульса на 3,5...5 %, а разгрузка – к увеличению на 1,1...2,5 % относительно времени на образцах перед их нагружением. Разрушение структуры при разгрузке образцов отмечено также и на тяжелом бетоне [127].

Из рис. 81 также видно, что состав бетона, его возраст и условия опыта оказывают значительное влияние на характер изменения модуля деформации керамзитобетона на кривой его нагружения. При этом характер деформирования образцов при осевом сжатии в возрасте бетона 28 суток принципиально отличается от характера деформирования контрольных образцов в возрасте 745 суток и рабочих образцов после воздействия 480 циклов теплосмен. Увеличение возраста и циклическое воздействие теплосмен приводит к уменьшению абсолютных значений модуля деформаций на кривой нагружения керамзитобетона обеих марок. Разброс абсолютных значений модуля сравниваемых образцов на уровне обжатия  $0,2...0,3 R_{np}$  также значительно превосходит разброс на уровне обжатия  $0,5...0,6 R_{np}$ . В этой связи при расчете конструкций из керамзитобетона более правильным было бы учитывать не изменение его модуля упругости во времени и от воздействия циклических теплосмен, а изменение модуля деформаций на уровне обжатия, соответствующем рабочему уровню нагружения.

Хотелось бы отметить, что негативное изменение упругих характеристик керамзитобетона при циклическом воздействии теплосмен, обусловившее возникновение трещин на микроуровне, имеет и позитивное значение, так как возникающие микротрещины обеспечивают большую пластичность этого материала на указанном уровне, что является важнейшим условием создания надежной конструкции для восприятия ударного и внезапного действия нагрузки или сейсмических воздействий. Оценка качества бетонов по удельной работе разрушения на 1 кг расхода цемента показывает значительное преимущество бетона марки 250.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях изучены деформативные особенности искусственных пористых заполнителей при увлажнении и высушивании, обусловленные их начальным напряженным состоянием.

Исследованы основные закономерности взаимодействия и взаимного влияния компонентов легкого бетона в процессе образования его структуры и прочности.

Обоснованы и установлены некоторые технологические факторы и приемы изготовления керамзито- и аглопоритобетона для наиболее рационального взаимодействия и взаимного влияния составляющих бетона.

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1) по деформативности пористых заполнителей при увлажнении и высушивании:

– усадка и расширение искусственных пористых заполнителей при изменении их влажности колеблется в широких пределах. Изменение объема составляет величину порядка усадки и расширения цементного камня и даже превосходит их. Для расчетов и эксперимента могут быть приняты следующие значения деформаций: для керамзита 1,3-2,1 мм/м расширение, 0,7-1,2 мм/м усадка; для аглопорита 0,5-0,8 мм/м расширение, 0,3-0,5 мм/м усадка;

– насыщение керамзита водой не приводит к снижению его прочности, поэтому понятие «коэффициент размягчения» не имеет для него реального значения. Это обстоятельство следует, в первую очередь, объяснить напряженным состоянием гранул заполнителя, возникающим в процессе быстрого перехода от пиропластического состояния к твердому;

– напряженное состояние гранул керамзита характеризуется напряжениями сжатия в ее оболочке и напряжениями растяжения в ядре. Их величина установлена по разработанной нами методике в пределах 30-35 кгс/см<sup>2</sup> для оболочки и 6-9 кгс/см<sup>2</sup> для ядра. В отдельных случаях, которые характеризуются ярко выраженным неравномерным распределением пор неправильной формы с крупными включениями типа каверн размером до 0,6 мм знак напряжения меняется на обратный, а именно, оболочка гранулы характеризуется напряжениями растяжения, а ядро – напряжениями сжатия. Выявленные показатели неоднородного напряженного состояния гранул керамзита указывают

на необходимость изыскания более рациональных режимов охлаждения и проведения более углубленных исследований в этом направлении;

- остаточные напряжения значительно уменьшаются с уменьшением размера гранул и существенно увеличиваются при отклонении формы гранул от оптимальной (шара) и особенно – при наличии на ней трещин, выступов и изломов;

- исходя из начального напряженного состояния, предельный размер зерен заполнителей для конструктивных легких бетонов не может быть более 20 мм. Желательно, для особо ответственных бетонов снизить его до 12-15 мм;

- при испытании аглопорита на сжатие в линейном напряженном состоянии с повышением напряжений до 40-60 % от разрушающих происходит увеличение его модуля упругости;

- пористому заполнителю (аглопорит) свойственно проявление ползучести. Это необходимо учитывать при оценке ползучести легких бетонов;

2) по возможности и эффективности действия предварительного обжатия пористого заполнителя:

- высказана и экспериментально доказана гипотеза «об эффекте предварительного обжатия пористого заполнителя, повышающего его растяжимость в легком бетоне»;

- в процессе создания структуры и формирования прочности легкого бетона растяжимость как растворной части, так и пористого заполнителя за счет его предварительного обжатия могут существенно изменяться. В результате этого соответствующее положение теории А.И. Ваганова требует более правильной формулировки;

- интенсивность обжатия во времени и ее конечная величина не являются функциями суммарной деформативности пористых заполнителей и окружающего их цементного раствора в каждый данный момент времени.

Может быть принята следующая общая схема деформирования воздушно-сухих заполнителей при нормальных условиях твердения бетона.

В начале происходит увеличение объема пористых заполнителей за счет поглощения влаги из раствора. Затем их деформация сжатия в результате обратной миграции влаги к цементному камню.

Параллельно с этим происходит усадка цементного раствора. Через определенный период времени величина обжатия цементной облоймой (за счет усадки) перегоняет сокращение размеров пористого

заполнителя за счет отдачи влаги. В дальнейшем идет процесс обжатия, если он не прерывается появлением разрывов цементной облоймы;

– повышение прочности легких бетонов в результате их более высокой растяжимости обусловленной предварительным обжатием пористого заполнителя, оценивается нами величиной порядка 15-17 %;

3) по технологически факторам, способствующим сохранению эффекта предварительного обжатия:

– оптимальная структура легких бетонов на данных исходных материалах в существенной степени зависит от условий твердения. Особое значение приобретает не только конечная прочность цементного камня, но и скорость ее нарастания: первым показателем оптимального режима твердения является реальность его немедленного создания после формовки бетонной смеси. Под этим понимаются два варианта: 1) нормальные (влажные) условия твердения; 2) выдержка до пропаривания для достижения критической прочности (по С.А. Миронову);

– деформации заполнителей, обусловленные их влажностным состоянием, оказывают значительное влияние на формирование структуры легкого бетона. Приготовление легкобетонной смеси наиболее рационально на заполнителях воздушно-сухого состояния, если последнее не противоречит бетоноукладываемости бетонной смеси;

– повторное вибрирование твердеющего легкого бетона оказывает положительное влияние на сохранение эффекта обжатия заполнителя. Однако, сроки вибрационного воздействия должны увязываться с кинетикой водопоглощения пористых заполнителей;

4) по улучшению структуры легких бетонов с эффектом предварительного обжатия.

В результате проявления эффекта обжатия пористого заполнителя концентрация структурных напряжений в цементном камне легкого бетона будет значительно меньше, чем на плотном. Следовательно, в нем будет меньше микротрещин, как следствие этого:

– долговечность легкого бетона будет выше, чем тяжелого;

– водопроницаемость легкого бетона будет меньше из-за лучшей структуры цементного камня;

– коррозионная стойкость легкого бетона будет выше, поскольку разгрузка цементного камня будет способствовать его высокой стойкости против действия агрессивной среды.

Исходя из этого, легкий бетон следует применять не только там, где требуется снизить вес сооружения, но и во всех случаях, где наиболее полно будут использованы его положительные качества по долговечности, водонепроницаемости и коррозионной стойкости.

5) Проведенные исследования не претендуют на окончательное решение поставленной задачи. Дальнейшие исследования в этом направлении будут способствовать решению ряда вопросов, связанных с разработкой теории и практики в формировании структуры и прочности легких бетонов.

6) Развита представления о реальной структуре цементного камня с учетом размеров блоков мозаик и дислокационных повреждений структуры. Определены размеры блоков мозаики, плотность дислокаций, число образующихся фаз и степень конденсации их структуры в зависимости от возраста цементного камня и процедуры введения в цементную композицию химических добавок, в частности, наиболее эффективной добавки для цементного теста – суперпластификатора С-3. Показано, что распад твердых растворов цементного камня, являющийся фазовым превращением, зависит в определенной мере от концентрации и процедуры введения модифицирующей добавки, а рецептурно-процедурный фактор является одним из эффективных физико-химических методов воздействия на формирование фазового состава и однородности дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня, предопределяющей как прочность, так и параметры разрушения последнего и композитов на его основе.

Установлены деформативные особенности искусственных пористых заполнителей (керамзита, термолита) при осевом сжатии и растяжении и выявлено принципиальное различие в характере диаграмм сжатия керамзитового гравия разных заводов, отличающихся толщиной обжиговой оболочки. Определены критические коэффициенты интенсивности напряжений  $K_c^*$  и акустические параметры разрушения ряда горных пород, используемых в качестве заполнителей, и предложен обобщенный критерий качества заполнителя  $K_k$ , который необходимо учитывать при выборе заполнителей для получения бетонов повышенной надежности (трещиностойкости).

Впервые в исследовательской практике было использовано предварительное тензометрическое тарирование элементов модели легкого бетона (зерен керамзита) для анализа напряженного состояния характерных зон деформационного поля плоской модели. Получены численные значения деформаций и напряжений в этих зонах, отражающие степень участия матрицы и включений в восприятии приложенной механической нагрузки. Показано зарождение и развитие микротрещин в характерных зонах в зависимости от свойств материального цикла модели с соответствующими параметрами элементов структуры ( $E_B/E_M$ , концентрация включений, сила сцепления).

Установлены две зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$  для конструкционного керамзитобетона, принципиально различающиеся по характеру выпуклости диаграммы деформирования, обусловленной особенностями диаграмм сжатия гранул керамзита. В этой связи для керамзитобетона, характеризующегося ростом величины модуля деформаций с повышением интенсивности напряжения, целесообразно как технически, так и экономически расчетный модуль упругости определять при уровне обжатия  $0,5...0,6 R_{\text{пр}}$ . Выявлен характер изменения деформативных, структурных и прочностных показателей в зависимости от возраста бетона, от циклического воздействия температур в интервале  $20...70$  °С и от интенсивности длительного нагружения.

Показано, что применение в оптимальных количественных дозировках как пластифицирующих добавок СП С-3 и ПДО-М, так и ускоряюще-противоморозной – УПМД, является весьма эффективным физико-химическим методом воздействия на формирование микро- и макроструктуры цементного бетона, определяющей параметры его разрушения, что открывает новые технологические возможности в повышении качества конструкционной прочности бетонов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Ахвердов, И.Н. О научных проблемах в области легких бетонов. В книге «Аглопорит и аглопоритобетон» [Текст] / И.Н. Ахвердов. – Минск, 1964. – С. 12-20
- 2) Ваганов, А.И. Керамзитобетон [Текст] / А.И. Ваганов. – Л.-М.: Госстройиздат, 1954. – 94 с.
- 3) Ваганов, А.И. Исследование свойств керамзитобетона [Текст] / А.И. Ваганов. – Л.-М.: Госстройиздат, 1960. – 109 с.
- 4) Скрамтаев, Б.Г. Крупнопористый бетон и его применение в строительстве [Текст] / Б.Г. Скрамтаев. – М.: Госстройиздат, 1955. – 178 с.
- 5) Симонов, М.З. Основы технологии легких бетонов [Текст] / М.З. Симонов. – М.: Стройиздат, 1973. – 584 с.
- 6) Симонов, М.З. О начальном модуле упругости легкого бетона на природных вулканических пористых заполнителях [Текст] / М.З. Симонов, С.Н. Евсеева // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 98-103.
- 7) Корнилович, Ю.Е. Керамзитобетон – прогрессивный строительный материал [Текст] / Ю.Е. Корнилович, М.Г. Вержбицкая. – Киев: Госстройиздат УССР, 1955. – 136 с.
- 8) Корнилович, Ю.Е. О формуле прочности легких бетонов [Текст] / Ю.Е. Корнилович, Ю.Д. Нациевский // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 90-97
- 9) Бужевич, Г.А. Исследование по крупнопористому бетону на пористых заполнителях [Текст] / Г.А. Бужевич. – М.: Госстройиздат, 1962. – 142 с.
- 10) Спивак, Н.Я. Влияние структуры керамзитобетона на его свойства в стеновых панелях [Текст] / Н.Я. Спивак, Д.К. Саулин, В.С. Баджагян // Бетон и железобетон. – 1965. – №11. – С. 11-16.
- 11) Ицкович, С.М. Крупнопористый бетон [Текст] / С.М. Ицкович. – М.: Стройиздат, 1977. – 120 с.
- 12) Ашрабов, А.Б. Керамзитобетон в несущих конструкциях [Текст] / А.Б. Ашрабов, А.Н. Добродеев. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1959. – 118 с.

13)Иванов, И.А. О некоторых закономерностях повышения прочности бетонов с пористыми заполнителями [Текст] / И.А. Иванов, А.И. Кротов, А.И. Тимофеев // Бетон и железобетон. – 1966. – №4. – С. 21-23.

14)Иванов, И.А. Исследование напряженного состояния аглопорита с контактирующимся цементным, методом электрической тензометрии [Текст] / И.А. Иванов, А.И. Кротов, А.И. Тимофеев // Бетон и железобетон. – 1967. – №3. – С. 19-23.

15)Иванов, И.А. Методика исследования адгезии вяжущего к заполнителю в легких конструктивных бетонах [Текст] / И.А. Иванов, А.И. Кротов // Методы испытаний пористых заполнителей, легкобетонных смесей конструкций из легких бетонов. – М., 1966. – С. 42-47.

16)Иванов И.А. О закономерностях, определяющих связь между однородностью бетона и его свойствами [Текст] / И.А. Иванов // Сб. научных работ Пензенского ИСИ, вып. 4. – Саратов-Пенза: Приволжское книжное издательство, 1967. – С. 4-15.

17)Малинина, Л.А. Пропаривание бетонов на искусственных пористых заполнителях [Текст] / Л.А. Малинина, В.А. Федоров // Легкие бетоны и заполнители. – Вып. 2. – Минск, 1961. – С. 37-44.

18)Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня [Текст] / Т. Пауэрс // IV Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 119-131.

19)Волженский, А.В. О процессах твердения цемента и их влиянии на микроструктуру и некоторые физические и механические свойства образующего камня [Текст] / А.В. Волженский, Ю.Д. Чистов // VI конференция по бетону и железобетону. – М.: Стройиздат, 1965. – С. 17-28.

20)Ахвердов, И.Н. Влияние фазовых превращений в процессе твердения цементного камня на его физико-механические и деформативные свойства [Текст] / И.Н. Ахвердов // Структура, прочность и деформации бетонов. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 122-138.

21)Ратинов, В.Б. Современные воззрения на процессы твердения портландцемента и пути их интенсификации [Текст] / В.Б. Ратинов, А.Е. Шейкин // Всесоюзное совещание по современным проблемам технологии бетона в промышленности сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1965. – С. 21-32.

22)Некрасов, В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих [Текст] / В.В. Некрасов // Известия АН СССР, ОТНЮ. – 1945. – №6. – С. 145-152.

23)Мощанский, Н.А. Плотность и стойкость бетонов [Текст] / Н.А. Мощанский. – М.: Стройиздат, 1951. – 158 с.



24)Шейкин, А.Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона [Текст] / А.Е. Шейкин // Труды МИИТ. – Вып. 69. – 1964. – С. 21-29.

25)Александровский, С.В. Некоторые особенности усадки бетона [Текст] / С.В. Александровский // Бетон и железобетон. – 1959. – №4. – С. 7-12.

26)Александровский, С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) [Текст] / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1966. – 354 с.

27)Чеховский, Ю.В. Изменение пористой структуры и форм связи в цементном камне в процессе его твердения [Текст] / Ю.В. Чеховский, В.А. Лейрих, В.М. Казанский // Коллоидный журнал. – Т.27. – 1965. – №1. – С. 186-192.

28)Чеховский, Ю.В. Понижение проницаемости бетона [Текст] / Ю.В. Чеховский. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.

29)Миронов, С.А. О физических основах теории твердения бетонов при тепловой обработке [Текст] / С.А. Миронов // Методика исследования деформаций и кинетики нарастания прочности различных бетонов в процессе тепловой обработки. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 17-24.

30)Малинина, Л.А. Ускорение твердения бетонов [Текст] / Л.А. Малинина, С.А. Миронов. – М.: Госстройиздат, 1964. – 230 с.

31)Малинина, Л.А. Деформации бетонов в процессе пропаривания и дальнейшего хранения в воздушно-сухих условиях [Текст] / Л.А. Малинина, В.А. Федоров // Известия Академии строительства и архитектуры СССР. – 1961. – №1. – С. 37-45.

32)Попов, Н.А. Подбор состава легких бетонов на искусственных пористых заполнителя [Текст]; под ред.проф. Н.А. Попова. – М.: Госстройиздат, 1962. – 136 с.

33)Скрамтаев, Б.Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси [Текст] / Б.Г. Скрамтаев. – М.: Изд-во ЦНИПС и ВИА им. Куйбышева, 1963. – 179 с.

34)Глужке, П.И. Заполнители из разрушенного бетона [Текст] / П.И. Глужке // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Т.35, Л., 1948. – С. 27-33.

35)Александрин, И.П. Прочность бетона в зависимости от рода каменного заполнителя [Текст] / И.П. Александрин // Прочность, упругость и ползучесть бетона. – Стройиздат Наркомстроя, 1941. – С. 10-17.

36)Свечин, Н.В. К вопросу о наименьшей прочности заполнителей бетона [Текст] / Н.В. Свечин // Исследование по технологии бетона. – М.: Госстройиздат, 1950. – С. 27-35.

37)Френкель, И.М. Технологические основы и расчет состава бетона [Текст] / И.М. Френкель. – М.: Госстройиздат, 1961. – 127 с.

38)Гордон, С.С. Структура бетона и его прочность с учетом роли заполнителей [Текст] / С.С. Гордон // Структура, прочность и деформации бетонов – М.: Стройиздат, 1966. – С. 272-289.

39)Ицкович, С.М. Прочность пористых материалов и бетонов на пористых заполнителях [Текст] / С.М. Ицкович // Производство легких заполнителей и бетонов на их основе. – Минск, 1963. – С. 45-53.

40)Маилян, Р.Л. Бетон на карбонатных заполнителях [Текст] / Р.Л. Маилян. – Изд-во Ростовского университета, 1967. – 244 с.

41)Френкель, И.М. Бетон для сборных железобетонных конструкций [Текст] / И.М. Френкель. – М.: Стройиздат, 1958. – 176 с.

42)Свечин, Н.В. Упругопластические свойства цементного камня [Текст] / Н.В. Свечин // Исследования по технологии бетона. – М.: Стройиздат, 1950. – С. 17-24.

43)Адамчиков, К.А. Активация заполнителей бетона [Текст] / К.А. Адамчиков // Автоматизация и усовершенствование процесса приготовления укладки бетонной смеси. – М., 1964. – С. 37-44.

44)Березин, Д.В. Влияние свойств щебня из пород различных генетических типов и структур на прочность и деформативность бетона [Текст] / Д.В. Березин, В.И. Галактионов, И.Ф. Фильченков // Нерудные строительные материалы. – Тольятти, 1966. – С. 45-52.

45)Фильченков, И.Ф. Влияние структурных особенностей заполнителя на прочность и деформативность бетона [Текст] / И.Ф. Фильченков, В.И. Галактионов, Д.В. Березин // VI конференция по бетону и железобетону. – Сб. 1. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 168-173.

46)Сорокер, В.И. Жесткие бетонные смеси [Текст] / В.И. Сорокер, В.Г. Довжик. – М.: Госстройиздат, 1961. – 137 с.

47)Десов, А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов [Текст] / А.Е. Десов // Структура, прочность и деформации бетонов. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 4-58.

48)Иванов-Дятлов? И.Г. Высокопрочный керамзитобетон и его применение в мостах и гидротехнических сооружениях [Текст] / И.Г. Иванов-Дятлов // Бетон и железобетон. – 1964. – №4. – С. 11-16/

49)Mix. Design and quality control of Concrete, Roads and Roads Construction, August, V32, №380, 1954.

50)Худавердян, В.М. Метод проектирования составов туфобетона [Текст] / В.М. Худавердян. – Академия наук Армянской ССР. – Ереван, 1950. – 68 с.

51)Тимофеев, А.И. Исследование свойств легких конструктивных бетонов в зависимости от вида пористого заполнителя [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.И. Тимофеев. – Новосибирск, 1965. – 22 с.

52)Цискрели, Г.Д. Влияние породы и вида крупного заполнителя на прочность бетона на разрыв [Текст] / Г.Д. Цискрели, В.И. Осидзе // Известия Тбилисского НИИ сооружений и гидроэнергетики. – Т. 8. – Тбилиси, 1955. – С. 25-30.

53)Элинзон, М.П. Влияние искусственных заполнителей на свойства легких бетонов [Текст] / М.П. Элинзон, И.А. Якуб, В.П. Старостина // Бетон и железобетон. – 1967. – №3. – С. 7-12.

54)Попов, Н.А. Основные свойства искусственных пористых заполнителей и легких бетонов на их основе [Текст] / Н.А. Попов, М.П. Элинзон, Я.Ш. Штейн // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 9-15.

55)Элинзон, М.П. Методы оценки прочности и стойкости пористых заполнителей [Текст] / М.П. Элинзон [и др.] // Методы испытания пористых заполнителей легкобетонных смесей и легких бетонов на пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 131-136.

56)Аракелян, А.А. К вопросу о контакте цементного камня и легкого заполнителя в бетоне [Текст] / А.А. Аракелян // Труды совещания по теории технологии бетонов. – Изд-во Академии наук Армянской ССР. – Ереван, 1956. – С. 47-52.

57)Попко, В.Н. Прочностные и упругопластические свойства легкого бетона на основе аглопорита окатанной формы [Текст] / В.Н. Попко, Ю.М. Григорьев // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 174-179.

58)Евдокимов, А.А. Технология и строительные свойства бетона на искусственных пористых заполнителях [Текст] / А.А. Евдокимов, О.Э. Пфлаумер. – М.: Госстройиздат, 1959. – 108 с.

59)Цискрели, Г.Д. Влияние изменения крупности заполнителя на прочностные и деформативные характеристики бетона [Текст] / Г.Д. Цискрели, А.Н. Джавахидзе // VI конференция по бетону и железобетону. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 129-134.

60) Хохрин, Н.К. Зависимость прочности керамзитобетона от формы и характера поверхности гранул керамзита [Текст] / Н.К. Хохрин В.П. Горных, Б.С. Комиссаренко // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 104-108.

61) Дерягин, Б.В. Адгезия [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1949. – 234 с.

62) Дебройн, Н. Адгезия, клеи, цементы, припои [Текст] / Н. Дебройн, Р.М. Гувинка. – Изд-во иностранная литература, 1954. – 176 с.

63) Викторов, А.М. О сцеплении камня с цементным раствором [Текст] / А.М. Викторов // Бетон и железобетон». – 1958. – № 2. – С. 21-24.

64) Шрейберг, А.К. Влияние породы и состояния камня на его сцепление с бетоном [Текст] / А.К. Шрейберг, Г.И. Горчаков, Л.И. Абрамов. – Л.-М.: Изд-во ВНИИГ. – Т. 71. – 1962. – С. 171-175.

65) Журавлев, В.Ф. Сцепление цементного камня с различными материалами [Текст] / В.Ф. Журавлев, Н.П. Шейерт // Цемент. – 1952. – №1. – С. 45-49.

66) Мунц, Г.Г. Конструктивные легкие бетоны на пористых заполнителях (обзор зарубежного опыта) [Текст] / Г.Г. Мунц. – М.: ЦИНИС Госстрой СССР, 1967. – 67 с.

67) Фрайфельд, С.Е. Физико-механические свойства бетона и керамзитобетона на керамзитовом гравии [Текст] / С.Е. Фрайфельд // ЦНИИСМ. Труды института. – Вып. IV. Государственное издательство строительной литературы, 1941. – С. 23-32.

68) Виноградов, Б.М. Влияние режима обжига и охлаждения на фазовый состав, структуру и прочность аглопорита [Текст] / Б.М. Виноградов, В.С. Фадеева, М.П. Элинзон // ВНИИНСП. – Вып.4. Физико-химические исследования строительных материалов. – М.: Госстройиздат, 1961. – С. 61-67.

69) Будников, П.П. Повышение прочности керамзита методом катализованной кристаллизации расплава [Текст] / П.П. Будников [и др.] // Строительные материалы. – 1967. – № 10. – С. 8-14.

70) Онацкий, С.П. Производство керамзита [Текст] / С.П. Онацкий. – М.: Стройиздат, 1971. – 312 с.

71) Полищук А.М. Использование механических колебаний для повышения качества строительных материалов и изделий [Текст] / А.М. Полищук. – Л., 1964. – 184 с.

72) Kruml F. Determination of the Strength Properties of Lightweight Natural and Artificial Aggregate for the Production of Dense Concrete. RILEM, Budapest, 1967.

73) Бужевич, Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях [Текст] / Г.А. Бужевич. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

74) Абрамов, В.Л. Водопоглощение легкого пористого заполнителя в водной среде [Текст] / В.Л. Абрамов // Вопросы технологии изготовления бетонных и железобетонных конструкций – М.: НИИОМТП Госстроя СССР, 1966. – С. 31-34.

75) Абрамов, В.Л. Об оценке водопоглощения пористых заполнителей в легкобетонных смесях [Текст] / В.Л. Абрамов // Бетон и железобетон. – 1967. – № 3. – С. 27-32.

76) Шалимо, Т.Е. Прочность и водонепроницаемость центрифугированного аглопоритобетона [Текст] / Т.Е. Шалимо // Новые строительные материалы и изделия. – Минск: Наука и техника, 1967. – С. 41-47.

77) Сашко, А.И. О характере влияния поверхностно-активных сред на прочность полиметилметакрилата [Текст] / А.И. Сашко, В.Ф. Коваль, А.Н. Тынный // Физико-химическая механика материалов. – Изд-во АН УССР. – Т. 3, 1967. – № 6. – С. 207-213.

78) Инструкция по эксплуатации ультразвукового измерителя скорости УЗИС [Текст]. – Л.: ЛЭТИ, 1965. – 57 с.

79) Дибров, Г.Д. Роль молекулярноповерхностных сил в механизме измерения прочности материалов при колебаниях влажности [Текст] / Г.Д. Дибров, М.С. Остриков, Ю.М. Куприй // РИСИ. Пути повышения стойкости и долговечности строительных материалов и конструкций. Изд-во Ростовского университета, 1966. – С. 19-25.

80) Кузнецов, В.Д. Поверхностная энергия твердых тел [Текст] / В.Д. Кузнецов. – М.: Гостехиздат, 1954. – 237 с.

81) Саталкин, А.В. Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении [Текст] / А.В. Саталкин, Б.А. Сенченко. – М.: Авто-трансиздат, 1956. – 216 с.

82) Балавадзе, В.К. Прочность и деформативность бетона при свободном и стесненном растяжении [Текст] / В.К. Балавадзе // VI конференция по бетону и железобетону. – Тбилиси: Издание АН Грузинской ССР, 1966. – С. 119-128.

83) Гвоздев, А.А. Температурно-усадочные деформации в массивных бетонных блоках [Текст] / А.А. Гвоздев. – Издательство АН СССР. – № 4. – ОТН. – 1953. – С. 189-201.

84) Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н.И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1961. – 288 с.

85) Попов, Н.А. Трещиностойкость легкого бетона [Текст] / Н.А. Попов, Л.П. Орендлихер // Бетон и железобетон. – 1962. – № 5. – С. 12-17.

86) Цискрели, Г.Д. Сопротивление растяжению неармированных и армированных бетонов [Текст] / Г.Д. Цискрели. – М.: Госстройиздат, 1954. – 174 с.

87) Ахвердов, И.Н. Влияние вибрации и ультразвуковых колебаний на формирование структуры цементного камня [Текст] / И.Н. Ахвердов, М.А. Шалимо // Бетон и железобетон. – 1960. – № 9. – С. 7-11.

88) Куннос, Г.Я. Вибрационная технология бетона [Текст] / Г.Я. Куннос. – Л.: Стройиздат, 1967. – 136 с.

89) Столяров, Я.В. Введение в теорию железобетона [Текст] / Я.В. Столяров. – М.: Госстройиздат, 1941. – 276 с.

90) Фрейсинэ. Переворот в технике бетона [Текст] / Фрейсинэ. ОНТИ, 1938. – 141 с.

91) Васильев, Л.И. Усадочные напряжения в элементах железобетонных конструкций [Текст] / Л.И. Васильев // Труды высшего военно-морского Военно-инженерного училища РКВМФ. – Вып.1. – М.-Л.: Госстройиздат, 1939. – С. 35-43.

92) Мейер, Нильсон. Новые данные по усадке бетона [Текст] / Нильсон Мейер; пер. с нем. // II Международный конгресс по бетону в Висбадене. – М.: Госстройиздат, 1960. – С. 47-54.

93) Вальц. Усадочные деформации и напряжения бетона [Текст] / Вальц; пер. с нем. // II Международный конгресс по бетону в Висбадене. – М.: Госстройиздат, 1960. – С. 55-60.

94) Корнилович, Ю.Е. Связующие свойства цементов [Текст] / Ю.Е. Корнилович. – Изд-во Академии наук УССР, 1952. – 150 с.

95) Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит. – М.: Госстройиздат, 1959. – 247 с.

96) Henk V. Betrachtung uber Yefligespach – nunges im Beton, Zement-Kalk-Yips. Bd.9, №3, 1956.

97) Knud E.C., Nielsen. Cement-och Betong – institutet, Intern. Rapport. Stockholm, 1955.

98) Скрамтаев, Б.Г. Исследование трещиностойкости легких бетонов кольцевым методом [Текст] / Б.Г. Скрамтаев, М.Ю. Лещинский, П.М. Вайсбанд // Бетон и железобетон. – 1965. – № 7. – С. 6-12.

99) Маилян, Р.Л. Методика испытания и оценки усадочной трещиностойкости бетонов [Текст] / Р.Л. Маилян // Бетон и железобетон. – 1968. – № 8. – С. 11-16.

100) Осидзе, В.И. Прочность и деформативность бетона на известковом заполнителе [Текст] / В.И. Осидзе // Всесоюзное совещание по современным проблемам технологии бетона в промышленности сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1965. – С. 141-147.

101)Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение образцов [Текст] / И.Н. Ахвердов, С.М. Ицкович // Бетон и железобетон. – 1961. – № 1. – С. 17-23.

102)Сегалова, Е.Е. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ [Текст] / Е.Е. Сегалова, П.А. Ребиндер // Строительные материалы. – 1960. – №1. – С. 5-12.

103)Стольников, В.В. Изменение структуры бетона в зависимости от его влагосодержания и возраста [Текст] / В.В. Стольников, В.Б. Судаков // Структура, прочность и деформации бетонов. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 161-170.

104)Гершберг, О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / Гершберг О.А. – М.: Стройиздат, 1965. – 312 с.

105)Бурлаков, Г.С. Технология изделий из легкого бетона [Текст] / Г.С. Бурлаков, А.Г. Комар. – М.: Высшая школа, 1966. – 273 с.

106)Инструкция. Прибор для измерения коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ-2 [Текст]. – Л.: ЛЭТИ, 1967. – 52 с.

107)Макридин, Н.И. Механические свойства керамзитового гравия при осевом сжатии [Текст] / Н.И. Макридин В.А. Тяпкин // Строительные материалы. – 1977. – №9. – С. 26-28.

108)Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии [Текст] / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2009. – №1. – С. 51-54.

109)Макридин, Н.И. Деформативные особенности конструктивного керамзитобетона при сжатии [Текст] / Н.И. Макридин, И.А. Иванов // Перспективы развития производства и применения легких бетонов и конструкций из них. Доклады II Всесоюзной конференции. – Тбилиси: Госстрой Грузинской ССР, 1975. – С. 9-19.

110)Макридин, Н.И. Физико-механические свойства зерен керамзитового гравия при осевом растяжении [Текст] / Н.И. Макридин, В.Л. Хвастунов // Строительные материалы. – 1976. – №8. – С. 27-28.

111)Бужевич, Г.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях из обожженных кремнистых пород (Обзор) [Текст] / Г.А. Бужевич [и др.]. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1977. – 44 с.

112)Иванов, И.А. Исследование физико-механических свойств термолита из опоки [Текст] / И.А. Иванов, Н.И. Макридин, Л.Л. Волчек // Керамзит и керамзитобетон. – М.: ВНИИСТРОМ, 1979. – №12. – С. 90-94.

113) Ахвердов, И.Н. Исследование концентрации напряжений в бетоне при сжатии на моделях из оптически активных материалов [Текст] / И.Н. Ахвердов, В.В. Скочеляс // Доклады Академии наук БССР. – 1970. – Т. 14. – №7. – С. 612-615.

114) Ахвердов, И.Н. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона [Текст] / И.Н. Ахвердов, А.Е. Смольский, В.В. Скочеляс. – Минск: Наука и техника, 1993. – 290 с.

115) Макридин Н.И., Хвастунов В.Л. Использование результатов исследования керамзитобетона на моделях для проектирования его состава [Текст] / Н.И. Макридин, В.Л. Хвастунов // Материалы VIII Всесоюзной конференции по бетону и железобетону. – Харьков, 1977. – Пенза: Пензенское НТО Стройиндустрия, 1977. – С. 21-24.

116) Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона [Текст] / А.Б. Пирадов. – М.: Стройиздат, 1973. – 135 с.

117) Бабков, В.В. Исследование взаимодействия крупного пористого заполнителя и раствора в бетонах на легких заполнителях, подвергнутых сжатию [Текст] / В.В. Бабков [и др.] // Структура, прочность и деформации легкого бетона. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 102-120.

118) Кудрявцев, А.А. Модуль упругости и модуль деформаций конструктивного керамзитобетона. Структура, прочность и деформации легкого бетона [Текст] / А.А. Кудрявцев. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 182-195.

119) Иванов, И.А. Влияние окружающей среды на деформации ползучести керамзитобетона [Текст] / И.А. Иванов, Н.И. Макридин, И.С. Гучкин // Проблемы ползучести и усадки бетона (II Всесоюзное совещание). – Ереван, 1974. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 80-84.

120) Иванов, И.А. О значении обратимости деформации конструкционного керамзитобетона [Текст] / И.А. Иванов, Н.И. Макридин, Т.Г. Сильванович // Бетон и железобетон. – 1976. – № 10. – С. 39-41.

121) Иванов, И.А. Местные строительные материалы [Текст] / И.А. Иванов, А.В. Кондрашов. – Пенза: Приволжское книжное изд-во, 1970. – 168 с.

122) Методические рекомендации по определению прочностных и структурных характеристик бетонов при кратковременном и длительном нагружении [Текст]. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1976. – 56 с.

123) Макридин, Н.И. Влияние технологических факторов и процедуры приготовления легкобетонной смеси на прочность термолитобетона [Текст] / Н.И. Макридин [и др.] // Материалы XXIX НТК ПГАСА. Пенза, 1977. – С. 94-96.



124)Иванов, И.А. Изменение свойств керамзитобетона при циклическом воздействии положительных температур [Текст] / И.А. Иванов, Н.И. Макридин // Строительные материалы из местного сырья. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1983. – С. 29-35.

125)Макридин, Н.И. Экспериментальные исследования структурных изменений конструкционного керамзитобетона [Текст] / Н.И. Макридин, Б.Р. Просмушкин // Повышение долговечности строительных материалов, изделий и конструкций на Севере. – Межвузовский сборник научных трудов. – Якутск: Якутский государственный университет, 1983. – С. 37-40.

126)Баженов Ю.М. Критерии оценки поведения бетона в жарком сухом климате [Текст] / Ю.М. Баженов // Бетон и железобетон. – 1971. – № 8. – С. 9-11.

127)Яшин, А.В. О некоторых деформативных особенностях бетона при сжатии [Текст] / А.В. Яшин // Теория железобетона. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 131-137.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ .....	7
1.1. Развитие воззрений на формирование структуры и прочности легких бетонов .....	7
1.2. Роль искусственных пористых заполнителей в процессе структурообразования и достижения высокой прочности легких бетонов .....	26
1.2.1. Влияние вида и строения пористых заполнителей .....	27
1.2.2. Влияние крупности и зернового состава пористого заполнителя .....	31
1.2.3. Влияние формы, характера и состояния поверхности пористых заполнителей .....	33
1.2.4. Влияние водопоглощения пористых заполнителей .....	35
1.2.5. Влияние степени насыщения бетона пористым заполнителем .....	37
1.3. Технологические особенности формирования структуры легких бетонов .....	41
2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ .....	47
2.1. Искусственные пористые заполнители как материал значительных внутренних напряжений структуры .....	47
2.2. Оценка остаточных (внутренних) напряжений гранулах пористого заполнителя – керамзита .....	49
2.3. Деформативность искусственных пористых заполнителей при контакте их с водной средой .....	53
2.4. Влияние степени водосодержания керамзита на его прочностные характеристики и изменения структуры .....	58
2.5. Исследования деформативных особенностей пористых заполнителей, вызванных попеременным насыщением в воде и высушиванием .....	64
2.6. Характеристики деформированного и напряженного состояний аглопорита при сжатии .....	68

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ .....	73
3.1. Исследование эффекта обжата на плоской модели .....	73
3.1.1. Исследование эффекта обжата в зависимости от пористости цементного камня .....	73
3.1.2. Исследование эффекта обжата в зависимости от структуры и упругих свойств заполнителя .....	83
3.1.3. Исследование эффекта обжата пористого заполнителя в зависимости от состава матричной составляющей.....	89
3.2 Исследование эффекта обжата на объемной модели .....	90
3.3. Исследование эффекта обжата пористого заполнителя в бетоне .....	97
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ПРИЕМОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ПРОЯВЛЕНИЮ ЭФФЕКТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ .....	101
4.1. Вопросы корреляции усадки и прочности бетонов .....	101
4.2. Влияние влажностного состояния заполнителей на формирование структуры и прочности легкого бетона с учетом эффекта обжата.....	107
4.3. Влияние повторного вибрирования на проявление эффекта обжата заполнителя в легком бетоне .....	117
4.4. Влияние добавки хлористого кальция на проявление эффекта обжата.....	123
4.5. Влияние последовательности загрузки материалов на физико-механические свойства аглопоритобетона и на проявление эффекта обжата заполнителя.....	125
5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	131
5.1. Механическое поведение керамзитового гравия при осевом сжатии и растяжении .....	131
5.2. Механическое поведение термолита из опоки .....	143
5.3. Механическое поведение керамзитобетона на структурных моделях бетона .....	148
5.4. Механическое поведение керамзитобетона при кратковременном нагружении .....	166

5.5. Механическое поведение термолитобетона при кратковременном нагружении.....	173
5.6 Механическое поведение керамзитобетона при циклическом воздействии положительных температур.....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	186
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	191

Научное издание

Максимова Ирина Николаевна  
Макридин Николай Иванович

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

Монография

В авторской редакции

Верстка Т.Ю. Симутина

---

Подписано в печать 22.09.14. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л.11,85. Уч.-изд. л.12,75. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ № 299.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г.Пенза, ул. Г. Титова, 28.