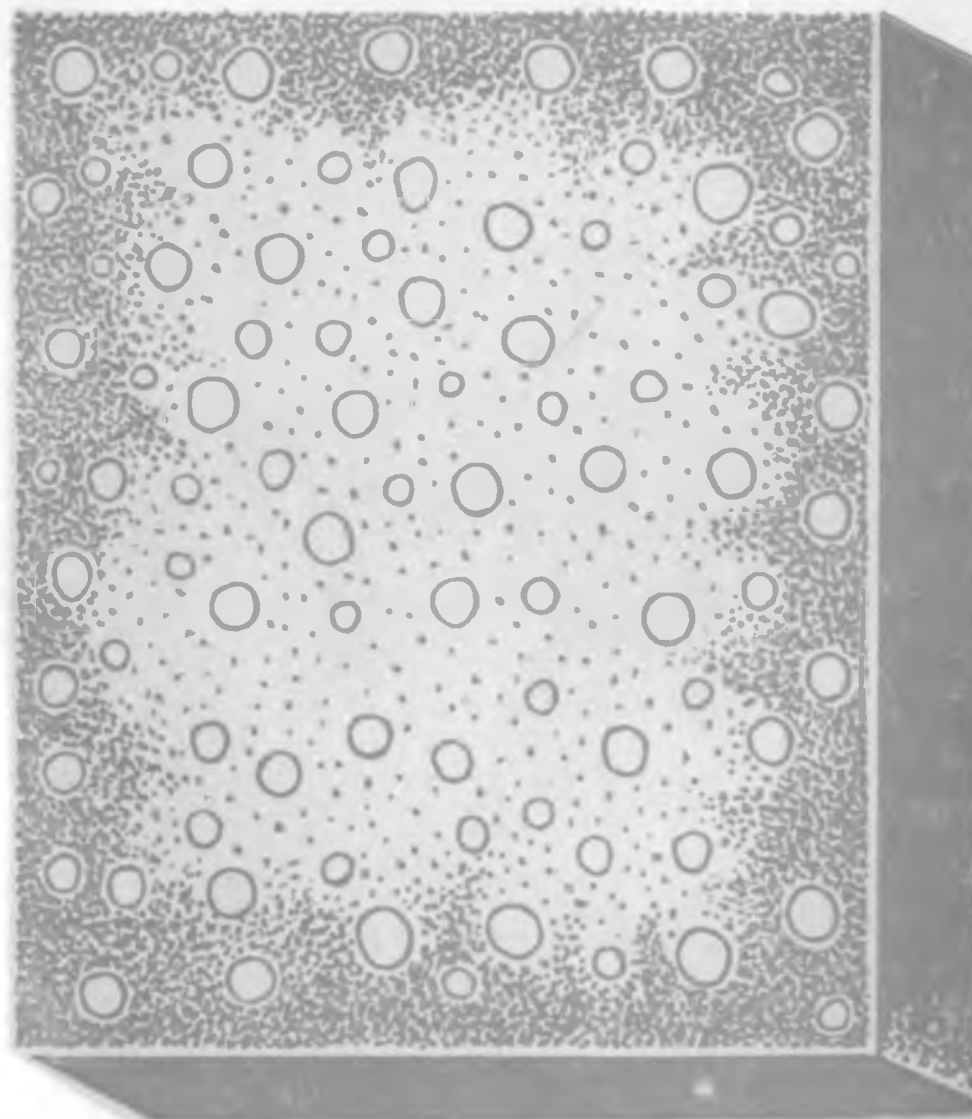


666.9

Б-54

# **БЕТОНЫ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОНОМЕРАМИ**



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УЗБЕКСКОЙ ССР  
ТАШКЕНТСКИЙ ОРДЕНА ДРУЖБЫ НАРОДОВ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. АБУ РАПХАНА БЕРУНИ

666.9  
Б-54

И. К. КАСИМОВ, В. М. ДЖАБАРОВ,  
Ю. В. МАКСИМОВ, Р. Л. СЕРЫХ

# БЕТОНЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОНОМЕРАМИ

ТАШКЕНТ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗБЕКСКОЙ ССР  
1982

9511

УДК 666.972:678.06

Касимов И. К., Джабаров В. М., Максимов Ю. В., Серых Р. Л.  
**Бетоны, модифицированные мономерами.** Ташкент, Издательство «Фан» УзССР,  
1982, с. 120.

В монографии изложены теоретические предпосылки формирования пористых материалов, методика выбора пропиточных материалов, технология подготовки бетонов в заводских условиях или на полигонах. Прослежена зависимость исходной прочности бетонов от вида пропиточных материалов, а структуры и свойств бетонополимеров — от различных технологических факторов и свойств применяемых материалов. Значительное место отведено технико-экономической характеристике бетонополимеров.

Для инженеров-строителей, проектировщиков, аспирантов и студентов строительных специальностей.

Табл.— 18, ил.— 31, библи.— 119 назв.

Ответственный редактор профессор Л. М. Ботвина

Рецензенты: доктор техн. наук Б. В. Гусев,

канд. техн. наук С. Х. Исламкулова

К  $\frac{30209-2047}{М 355(04)-82}$  217—82 3203000000

© Издательство «Фан» Узбекской ССР, 1982 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач, стоящих перед строительной промышленностью страны в 1981—1985 гг. и последующие годы, в соответствии с решениями XXVI съезда КПСС является переход на выпуск легких промышленных конструкций, обладающих повышенной долговечностью в различных условиях эксплуатации.

Бетон, основной строительный материал промышленного и гражданского строительства, имеет такие существенные недостатки, как низкие химическая стойкость и морозостойкость, повышенные проницаемость, склонность к абразивному износу и др., которые резко снижают долговечность железобетонных строительных конструкций, повышают их материалоемкость и трудозатраты при монтаже и ремонте. Главная причина отрицательных качеств бетона — его большая пористость (10—30%) с высокоразвитой внутренней поверхностью.

Одним из эффективных путей улучшения качества и увеличения срока службы железобетонных конструкций является широкое использование для их изготовления специальных видов бетонов, в том числе с применением полимеров.

Советские ученые совместно со специалистами проектных и производственных организаций в последние годы провели большие исследования, направленные на успешное решение ряда вопросов по созданию новых типов бетонов, содержащих полимеры и обладающих высокими прочностными показателями, химической стойкостью, морозостойкостью, непроницаемостью и другими положительными качествами, а именно: полимербетонов, бетонополимеров, полимерцементных и полимерсиликатных бетонов.

Свойства бетона можно значительно улучшить, заполняя его поровое пространство высокопрочными полимерами. В результате у бетона повышается прочность на сжатие до 120—200 МПа, на растяжение — до 10—20 МПа, резко возрастает морозостойкость, химическая стойкость, непроницаемость, абразивная стойкость и др. К настоящему времени в результате широких исследований, проведенных в СССР, Франции, США, Японии и других зарубежных странах, разработаны основы производства бетонов,

пропитанных полимерами (бетонополимеров), которые включают сушку изделия или конструкции из отвержденного бетона, пропитку его мономером и полимеризацию последнего в порах бетона. Однако вопросы о технологии и свойствах бетонополимеров освещены в основном в журнальной литературе, что затрудняет ознакомление с производством и применением этого вида материалов. Немногочисленны публикации, посвященные разработке упрощенной технологии, а также расчетным характеристикам бетонополимеров.

Учитывая большую потребность различных отраслей (в особенности специальных) строительства и промышленности в высокопрочных и долговечных материалах, можно надеяться, что сведения, изложенные в этой книге о бетонополимерах, помогут в создании высокоэффективных конструкций и изделий, предназначенных для эксплуатации в районах с сухим жарким климатом.

Первая глава монографии написана д. т. н. И. К. Касимовым, вторая, третья — И. К. Касимовым, к. т. н. Ю. В. Максимовым, четвертая — И. К. Касимовым, к. т. н. В. М. Джабаровым, пятая — В. М. Джабаровым, шестая, седьмая — к. т. н. Р. Л. Серых, восьмая — В. М. Джабаровым, Ю. В. Максимовым, девятая — Ю. В. Максимовым.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору, д. техн. н., лауреату Государственной премии СССР Б. В. Гусеву, профессору Л. М. Ботвиной и доценту С. Х. Исламкуловой за просмотр рукописи и ценные замечания по содержанию книги.

## Глава I. БЕТОН В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУХОГО ЖАРКОГО КЛИМАТА

### 1. 1. Влияние строения поровой структуры бетона на его физико-механические свойства

Цементный бетон по своей природе — типичный представитель капиллярно-пористых материалов. Именно это свойство и определяет его технические свойства, долговечность, стойкость в агрессивных средах.

Цементный камень как основной компонент бетона, будучи минеральным клеем, скрепляет в монолит мелкий и крупный заполнитель, поэтому бетон относится к композиционным материалам, а его структурными элементами служат цементный камень (матрица), зерна заполнителя и контактный слой между ними. Сращивание матрицы и заполнителя, происходящее через контактный слой, обеспечивает структурную целостность бетона и распределение нагрузки между матрицей и заполнителем. Однако на свойства бетона существенно влияет структура его порового пространства, так как даже незначительное по объему количество пустот в материалах резко изменяет их свойства.

А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер [105] под поровым пространством бетона подразумевают все его несплошности, не занятые твердой фазой исходных материалов и новообразований. Основной носитель пористости в обычном тяжелом бетоне на плотных заполнителях — цементный камень. На него приходится около 70—80% общей пористости бетона [40, 92, 109]. В настоящее время предложено несколько классификаций пористости.

По классификации Г. И. Горчакова [18], в цементном камне различаются три группы пор: геля, капиллярные и контракционные. Поры геля — это промежутки между частицами гидратированного цемента, имеющие размер 0,01—0,001 мкм. Они заполнены адсорбционно-связанной водой, переходящей в лед при очень низких температурах (около —78°C), водонепроницаемы и не ухудшают морозостойкость бетона.

Образование капиллярных пор связано с избыточным количеством воды, которое вводится в бетонную смесь для придания ей необходимой подвижности. Объем такой воды зависит от водоцементного отношения ( $V/C$ ), содержания воды и цемента, степе-

ни гидратации и других факторов. Размер капиллярных пор колеблется от 0,1 — 1 до 20—50 мкм и более. Они доступны для воды и агрессивных жидкостей при обычных условиях насыщения. Большое количество капиллярных пор обуславливает низкую морозостойкость бетона. Капиллярная пористость цементного камня тем больше, чем выше начальное В/Ц и меньше степень гидратации цемента. В условиях продолжающейся гидратации цемента капиллярная пористость с течением времени уменьшается. Это вызвано тем, что объем цементного геля с порами в 2,2 раза больше объема негидратированного цемента. В связи с этим продукты гидратации цемента заполняют и часть капиллярных пор [18].

Контракционные поры возникают вследствие контракции системы цемент — вода. По своим размерам они занимают промежуточное положение между порами геля и капиллярными порами.

Общую пористость бетона определяют не только перечисленные три группы цементного камня. В бетонной смеси всегда имеется некоторое количество воздуха, который был вначале адсорбирован на поверхности зерен цемента и заполнителей и при перемешивании не был удален ввиду неполного смачивания зерен. Кроме того, часть воздуха вовлекается в смесь при ее укладке в формы. Эти воздушные поры обычно имеют сферическую форму и размеры в среднем 25—50 мкм [6].

Ухудшают структуру бетона также и седиментационные поры, образуемые в результате наружного и внутреннего водоотделения. Внутреннее происходит при укладке подвижных смесей, когда вода, скапливаясь под зернами крупного заполнителя, ослабляет связь между ним и цементным раствором. Вдоль этой слабой зоны развиваются внутренние усадочные трещины. При наружном водоотделении часть воды затворения, обтекая крупный заполнитель, выходит наверх, образуя систему направленных сообщающихся капиллярных пор [18]. Седиментационные поры имеют размеры 50—100 мкм и служат основными путями проникания в бетон воды. В седиментационных порах вода находится в свободном состоянии, поэтому оказывает большое влияние на фильтрацию в бетонах.

Таким образом, поровое пространство бетона представляет собой систему хаотически распределенных пор размером от 0,001 до 100 мкм и более. Свойства капиллярно-пористых тел функционально зависят от пористости. Так, пористость является главным фактором, определяющим прочность цементного камня и бетона, вследствие того, что не только уменьшает его эффективное сечение, воспринимающее нагрузку, но и способствует концентрации внутренних напряжений.

В общем случае зависимость прочности от пористости определяется формулой Скрамтаева — Боломея:

$$R_d = AR_n(C/B \pm C), \quad (1)$$

где  $R_b$  — прочность бетона в возрасте 28 суток;

$R_n$  — активность цемента;

$A$  и  $C$  — эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние заполнителей и технологий на свойства бетона.

Деформативные показатели бетона также значительно зависят от пористости. При небольших напряжениях и кратковременных нагрузениях больше 0,2 от предела прочности отмечается остаточная деформация. За начальный модуль упругости бетона принимается отношение нормального напряжения к относительной деформации при величине напряжений не более 0,2 от предела прочности. Причем чем выше плотность бетона, тем больше его прочность и модуль упругости. Пористость во многом определяет усадку и ползучесть бетона. В связи с этим большое влияние приобретает влажность бетона. Изменение содержания влаги в порах регулирует силы капиллярного давления, стягивающие скелет цементного камня. С увеличением влажности эти силы ослабевают, и цементный камень расширяется, а с уменьшением капиллярное давление возрастает и происходит деформация усадки.

Пористая структура бетона существенно влияет и на его проницаемость. Перенос жидкостей через бетон характеризуется тремя основными режимами: молекулярной диффузией, вязкостным (пуазейлевским) и молекулярным (кнудсеновским) потоками, коэффициент проницаемости ( $\text{см}^2/\text{с Па}$ ) которых характеризуется соответственно от  $10^{-7}$  и более, от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  и от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$ . Классификация режимов переноса жидкостей через бетон более подробно анализируется в трудах [103].

При замораживании и оттаивании вода, содержащаяся в порах влажного бетона, вследствие фазовых превращений способствует развитию деструктивных процессов в структуре материала. При температурах  $-5^\circ$  и  $-8^\circ\text{C}$  в крупных порах она замерзает и переходит в лед, при этом объем ее увеличивается на 9%. Если поры насыщены водой частично, то образующийся лед плотно смерзается со стенками пор и при отрицательной температуре воспринимает нагрузку вместе с каркасом материала. При этом лед повышает прочность бетона на сжатие и растяжение. Однако если коэффициент насыщения пор водой приближается к 1, то в стенках их возникают большие растягивающие напряжения, так как лед совершает уже работу разрушения. Возникновение льда при замораживании и исчезновение при оттаивании сопровождается чередующимися знакопеременными деформациями и деструктивными явлениями [18].

Особую опасность для бетона представляют жидкие агрессивные среды, которые вызывают в нем развитие коррозионных процессов. Основные виды коррозии бетона, согласно классификации В. М. Москвина [61], подразделяются на три вида.

Коррозия первого вида — физический процесс, возникающий в бетоне при воздействии мягкой воды. Составные части цементного камня при этом растворяются и вымываются, проис-



ходит выщелачивание гидроокиси кальция и, как следствие,— потеря прочности растворной части бетона.

Коррозия второго вида — химическое взаимодействие между цементным камнем и агрессивными веществами. Образующиеся при этом продукты реакции либо легко растворяются и уносятся водой, либо в виде аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами, остаются на месте реакции. К этому виду относятся процессы взаимодействия бетона с кислотами и магниевыми солями.

Коррозия третьего вида — образование в порах и капиллярах бетона малорастворимых солей большим объемом, чем исходные продукты реакции. Это приводит к внутренним напряжениям в бетоне, способствующим образованию крупных трещин и дефектов.

Развитие третьего вида коррозии в значительной мере зависит от поровой структуры бетона. В то же время пористость влияет на развитие первого и второго видов коррозии, так как она увеличивает поверхность взаимодействия материала с агрессивными жидкостями и облегчает их проникание в глубь бетона.

Таким образом, цементные бетоны, наряду с положительными свойствами, имеют и существенные недостатки, обусловленные его капиллярно-пористой структурой. Особенно отчетливо они проявляются в районах с сухим жарким климатом при наличии сильно агрессивных жидких сред.

## **1. 2. Поведение бетона в условиях воздействия сухого жаркого климата в агрессивных средах**

Согласно схематической карте климатического районирования, республики Средней Азии и некоторые другие области относятся к районам с сухим жарким климатом [56].

Климат Средней Азии резкоконтинентальный, субтропический. В зимний период над ее территорией обычно концентрируется воздух из умеренных широт, а в летний — тропических. Отсутствие горных барьеров на севере и западе и небольшая их высота на юге (Копетдаг) не препятствуют активной циркуляции воздушных масс. В ней участвуют арктические, умеренные и тропические воздушные массы. Сравнительно холодная зима с неустойчивой погодой, частыми оттепелями, большой облачностью и осадками в обширных районах Средней Азии в ноябре — апреле обусловлена близостью очень теплого тропического воздуха, формирующегося над Афганистаном, Ираном, Аравией, и холодного умеренных широт над северной частью Средней Азии и Казахстана.

В мае — октябре температурные контрасты между Средней Азией и районами, расположенными южнее, сглаживаются. Средняя Азия превращается в очаг формирования тропического туранского климата с высокими температурами (27—31°C). Циклоническая деятельность здесь в это время почти прекращается, при-

чем одновременно с осадками, и температура воздуха резко меняется периодически в связи с холодными вторжениями, на долю которых приходится 33,7%. В теплое полугодие в связи с высокими температурами наблюдается термическая депрессия (7,5%), которая действует как вентилятор, вовлекая в свою циркуляцию холодные вторжения и периодически прерывая нарастание высокой температуры.

Радиационные факторы играют решающую роль в формировании микроклимата во многих районах Средней Азии: они определяют высокие летние температуры воздуха и почвы и чрезвычайную сухость в летний период [38].

В целом под сухим жарким климатом понимается присущая данной местности совокупность характерных метеорологических условий, отличающихся продолжительным знойным летом (более 100 дней в году), высокими температурами воздуха — абсолютной, максимальной, равной или превышающей  $+40^{\circ}\text{C}$  и средней самого жаркого месяца, равной или превышающей  $29-30^{\circ}\text{C}$  при средней относительной влажности воздуха самого жаркого месяца менее 50—55%.

Сухой жаркий климат характеризуется также большими перепадами температуры и относительной влажности воздуха в течение суток (днем и ночью), сильным циклическим нагревом, в течение суток открытых поверхностей почвы и строительных конструкций в результате интенсивной солнечной радиации и наличием суховеев.

Наиболее существенную опасность для цементных бетонов из вышеперечисленных факторов представляет циклическое воздействие повышенных температур. Колебания температуры в условиях сухого жаркого климата весьма значительны. Так, в летнее дневное время обращенная к Солнцу поверхность бетона нагревается до  $75-85^{\circ}\text{C}$ , на теневой стороне до  $35-45^{\circ}\text{C}$ . Ночью бетон охлаждается только до  $10-20^{\circ}\text{C}$ . Перепады температур по толщине конструкции зданий весьма велики и в различные месяцы составляют  $25-35^{\circ}\text{C}$ .

В высушенном на солнце бетоне из-за потери влаги приостанавливаются процессы дальнейшей гидратации вяжущего, но продолжают действовать температурные деформации, вызываемые его циклическим нагревом и охлаждением. В связи с разными значениями этих деформаций для цементного камня и заполнителя в кристаллизационной структуре цементного камня и на границе его контакта с заполнителем образуются микротрещины [39, 99].

В условиях жаркого климата при нагреве бетона происходят обратимая деформация — температурное расширение и необратимая — температурно-влажностная усадка. Температурная деформация расширения бетона в основном зависит от вида наполнителя и влажности бетона. Нагрев до  $100^{\circ}\text{C}$  и менее приводит к расширению цементного камня, которое при более высоких темпе-

ратурах компенсируется температурно-влажностной усадкой, вызванной удалением адсорбционно-связанной воды. При нагреве бетона с большой влажностью наблюдается обратимая деформация, так как удаление свободной воды не вызывает усадки до тех пор, пока влажность бетона выше оптимальной. При эффективной влажности бетон имеет максимальную степень увлажнения, но свободная вода отсутствует [1].

При нагреве бетона с влажностью меньше эффективной температурно-влажностная усадка происходит даже при кратковременном нагреве и для обычного бетона вызывается в основном усадкой цементного камня [32].

Увеличение размеров бетона при нагреве до 60—80°C объясняется следующим. Из-за неравномерной влажности бетона по сечению в центре элемента остается свободная влага, которая после нагрева устремляется к поверхности бетона, и он набухает. Кроме того, на границе контакта цементного камня и заполнителя при нагреве возникают внутренние радиальные температурные напряжения, превышающие прочность цементного камня на растяжение. Они вызывают образование микротрещин вокруг зерен крупного заполнителя [99]. По мере нагревания образца адсорбционно-связанная вода удаляется и развиваются необратимые деформации, которые, расшатывая структуру бетона, все же при высыхании его затухают. Однако в бетонном элементе по-прежнему действуют обратимые деформации, что увеличивает раскрытие микротрещин, образовавшихся при необратимых деформациях.

Кроме того, отмеченные деформации соответственно понижают прочностные показатели и другие физико-технические свойства бетона. Так, Ю. М. Баженов отмечает, что циклический нагрев бетона до температуры 50—60°C уменьшает прочность его при сжатии на 30—35%, а при растяжении еще более значительно [5]. Циклический нагрев бетонных и железобетонных конструкций, помимо снижения прочности, способствует возникновению прерывистых поверхностных трещин, которые весьма опасны для сооружений, действующих в условиях воздействия агрессивных сред.

Бетонные и железобетонные конструкции во многих районах Средней Азии и Южного Казахстана, подвергаются коррозии, вызванной большой засоленностью грунтов, в основном лессовидных суглинков, содержащих сульфаты и хлориды натрия, магния и кальция. Степень засоленности их достигает 20% и выше [37].

При контакте с агрессивными засоленными грунтами в порах и капиллярах бетона накапливаются кристаллы солей либо вследствие химических реакций взаимодействия агрессивных сред и составных частей цементного камня, либо приносятся извне и выделяются из раствора в процессе его постепенного высыхания. Согласно классификации В. М. Москвина [61], эти процессы можно отнести к коррозии третьего вида. Рост кристаллов солей в

определенный момент приводит к возникновению значительных растягивающих усилий в стенках пор и капилляров и разрушению структурных элементов бетона. Особенно опасна кристаллизация солей в результате капиллярного подсоса и испарения минерализованных вод при эксплуатации конструкций в условиях повышенных температур окружающей среды. По данным А. И. Минаса [64], в случае подсоса растворов солей при температуре 28—30°C и относительной влажности воздуха 40—45% через 120 дней эксплуатации сооружений давления, возникающие при кристаллизации сульфата натрия и сульфата магния, достигают соответственно 0,44 и 0,35 МПа. Весьма опасно, когда в порах бетона кристаллизуются безводные соли, которые при соответствующих условиях превращаются в кристаллогидраты. Этот процесс сопровождается значительным увеличением объема твердой фазы и возникновением больших внутренних напряжений в бетоне [61].

Нельзя не учитывать и термические напряжения, а также роль химических и фазовых превращений, способствующих развитию осмотических явлений, и циклический характер воздействия растворов солей. Дело в том, что смена дня и ночи и температурных режимов значительно изменяет растворимость солей и условия подсоса и кристаллизации.

Микротрещины, образующиеся в структуре бетона в сухом жарком климате в результате усадки и температурных воздействий, способствуют увеличению объема порового пространства и накоплению кристаллов солей вследствие возникающих в них расклинивающих усилий. Фундаментальные исследования солевой формы физической коррозии бетона и железобетонных конструкций подробно описаны в литературе [32, 37, 27, 61, 63, 64, 62]. Для предотвращения этого вида коррозии на практике стремятся создать плотную структуру бетона с открытой пористостью не более 2% или изолировать поверхность конструкций непроницаемыми материалами.

В последнее время для улучшения свойств бетона успешно используют полимерные материалы, которые позволяют повысить химическую стойкость, прочность и другие свойства бетона.

## Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛИМЕРБЕТОНАХ

Синтетические полимерные материалы находят все большее применение в технологии бетона. Они обладают гаммой положительных свойств, к которым, кроме высокой химической стойкости, относятся малая объемная масса, высокие прочностные показатели, хорошая адгезия к компонентам бетонов. Но наряду с этим полимеры имеют и недостатки: ограниченная термо- и огнестойкость, большая усадка, подверженность климатическому старению. Поэтому выбор полимеров, используемых в технологии бетона, должен осуществляться с учетом как их достоинств, так и недостатков.

теста проявляется слабо. При введении ГКЖ-94 объемная масса бетонной смеси уменьшается, что объясняется химическим взаимодействием между гидроокисью кальция и добавкой ГКЖ-194, сопровождающимся выделением водорода, который образует равномерно распределенные замкнутые поры в бетоне [11].

В. Г. Батраков установил, что добавки кремнийорганических полимеров увеличивают солестойкость бетонов, причем ГКЖ-94 в большей степени, чем ГКЖ-10. На основе кремнийорганических полимеров существенно повышается и морозостойкость полимерцементных бетонов. Так, использование ГКЖ-94 в полимерцементных бетонах позволяет получать марку по морозостойкости Мрз 300—600 [12]. Увеличивают морозостойкость, но в меньшей степени, чем ГКЖ-94, и водорастворимые смолы типа ТЭГ-1 и др.

Введение полимерных добавок либо не повышает марку бетона, либо способствует незначительному возрастанию предела прочности на сжатие. Более того, при влажном хранении прочность полимерцементных бетонов может снижаться. В то же время полимерцементный бетон по сравнению с обычным бетоном обладает повышенной прочностью при растяжении и изгибе, хорошей адгезией, высокой износостойкостью, поэтому широко применяется при строительстве дорог, устройстве полов, для изготовления отделочных материалов.

По мнению В. И. Соломатова [85], полимерцементный бетон имеет более высокую непроницаемость, чем обычный (в 2—4 раза), прочность (на 15—20%) и др. Полимерцементный бетон успешно применялся для торкретирования поверхности железобетонных резервуаров для хранения воды и других слабоагрессивных жидкостей. Доказано, что бетон, модифицированный эпоксидной смолой ЭД-20, обладает повышенной (до 20—30%) прочностью при сжатии и растяжении. Водонепроницаемость модифицированного бетона увеличивается с В6 до В12 по ГОСТу 4800-59. Адгезионная прочность полимерцементных бетонов со старым бетоном возрастает на 20—30%.

В последнее время разработаны и внедряются в строительство новые химические добавки — суперпластификаторы. Это в основном синтетические полимерные вещества, которые вводятся в бетонную смесь в количестве 0,1—0,2% от массы цемента. Действие их 2—3 ч с момента введения в бетонную смесь. Под влиянием щелочной среды суперпластификаторы подвергаются частичной деструкции и переходят в другие вещества, безвредные для бетона и не тормозящие в отличие от обычных пластифицирующих добавок процессы его твердения. Кроме того, они разжижают бетонную смесь в большей степени, чем обычные пластификаторы. Использование суперпластификаторов в цементнобетонной технологии позволит получать высокопрочные и плотные бетоны при существенной экономии цементного вяжущего.

Возможности полимерцементных бетонов в настоящее время далеко не исчерпаны. Эта область материаловедения лежит на стыке технологии бетона, с одной стороны, и химии высокомолекулярных соединений — с другой.

## 2. 2. Полимербетоны

Исследования полимербетонов в СССР были начаты в НИИЖБе, МИИТе, ЦНИИподземшахтострое и МХТИ им. Менделеева в 1958 г. под руководством проф. С. С. Давыдова.

Проблеме создания высокопрочных и химических стойких бетонов с использованием полимерных связующих посвящены работы ведущих отечественных исследований: Ю. М. Баженова, С. С. Давыдова, А. М. Иванова, Н. А. Мошанского, В. И. Соломатова, В. В. Патуроева, И. Е. Путляева, И. А. Рыбьева, М. Тахирова и других.

В последние годы интенсивные исследования их на основе метилметакрилата, полиэфирных и других смол проводятся в США, Англии, Италии, Японии и других странах [85], в Финляндии на фурфуролацетоновых смолах, во Франции — на полиэфирных и эпоксидных смолах.

Значительное внимание полимербетонам уделяется в Болгарии, ГДР, Румынии, Чехословакии и других социалистических странах.

Технология получения полимербетонов практически не отличается от технологии обычных цементных бетонов. Полимербетоны можно получить на основе термопластичных и термореактивных полимеров. Для изготовления несущих конструкций применимы только полимербетоны на основе реактопластов, так как полимербетоны на термопластах имеют незатухающую ползучесть и нетермостойкость.

Основные свойства полимербетонов определяются химической природой синтетического вяжущего, видом и содержанием мелкодисперсной фракции заполнителей. Крупные фракции тяжелых заполнителей (песок и щебень) влияют на основные физико-механические свойства в меньшей степени.

В зависимости от области применения полимербетонов в качестве связующего могут быть использованы полиэфирные, акрилатные, карбомидные, фенолформальдегидные, эпоксидные, фурановые смолы и их модификации.

Полимербетоны на полиэфирных смолах стойки в кислых средах, но малостойки в щелочных средах и весьма деформативны. Карбомидные смолы — наиболее дешевые связующие для изготовления полимербетонов, однако использование их ограничивается из-за невысокой прочности и химической стойкости. Наиболее распространены полимербетоны на фурановых смолах типа ФАМ.

Минеральные заполнители в полимербетонах служат отошающими добавками, снижающими стойкость полимерных изделий; они ограничивают температурные и влажностные деформации;

регулируют плотность, прочность, твердость, физико-механические свойства изделий.

Заполнители для полимербетонов по химическому составу работе [70] предложено делить на четыре основные группы:

- 1) кремнеземистые (кварцевый песок, аэросил и др.);
- 2) карбонатные и основные (известняк, доломит, диабаз и др.);
- 3) углеграфитовые (кокс, графит);
- 4) водные силикаты алюминия и магния (каолин, тальк).

Особое значение имеет химическая природа заполнителей. Например, в полимербетонах с кислым отверждением синтетических смол (ФА и ФАМ) нельзя использовать карбонатные или основные наполнители (доломит, диабаз и др.), так как такая композиция не отверждается.

Химическая стойкость полимербетонов — главное их свойство, отличающее их от многих других материалов. Поэтому полимербетоны наиболее рационально использовать в условиях воздействия агрессивных сред без дополнительной химической защиты.

Многочисленные исследования коррозионной стойкости легких и тяжелых полимербетонов, выполненные в НИИЖБе, МИИТе, САНИИРИ и других организациях, показали, что с повышением концентрации кислот в пределах их неокислительных свойств коэффициент стойкости полимербетонов, как правило, повышается. Серная кислота по отношению к полимербетонам агрессивнее, чем соляная, но наибольшее снижение прочности наблюдается при действии на них воды [88].

Стойкость в кислотах, щелочах, бензине, толуоле, минеральном масле составов на основе фурановых смол весьма велика, и каких-либо снижений прочности при выдерживании в них полимербетонов в течение года не отмечается. Хорошие результаты по химической стойкости имеют эпоксидные полимербетоны. Однако в горячих агрессивных средах кислотостойкость их резко снижается, но сохраняется щелочестойкость.

Высокая химическая стойкость и другие положительные свойства большинства полимербетонов (табл. 2.1) способствовали их широкому использованию на предприятиях химической промышленности, цветной металлургии и других отраслях народного хозяйства [70]. Однако применение полимербетонов в сооружениях, возводимых в районах с сухим жарким климатом при прямом воздействии интенсивной солнечной радиации и повышенных температур воздуха, ограничено.

Опыт использования наполненных полимеров [42, 56] позволил выявить существенный недостаток — склонность к климатическому старению, выражающемуся в ухудшении свойств при эксплуатации. Главные виды воздействия, вызывающие старение полимеров в естественных климатических условиях, — солнечная радиация, влага, кислород, озон, повышенная температура и ее резкие колебания, промышленные газы, агрессивные среды. Как установлено [56], солнечная радиация вызывает старение полиме-

ров по всех климатических зонах, особенно в районах Средней Азии.

Постоянно действующий фактор при старении полимеров — кислород воздуха. Даже частичное окисление вызывает их неустойчивость при действии других атмосферных факторов. Иницирование процесса окисления может вызываться повышением температуры или присутствующими в полимере примесями. В естественных условиях окислительные реакции доминируют среди раз-

Таблица 2.1

Основные физико-механические свойства полимербетонов на различных синтетических смолах

| Свойства                                                | Полимербетоны           |                         |                         |                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                         | легкие ФАМ              | легкие полиэфирные      | тяжелые карбомидные     | тяжелые ФАМ             |
| Объемная масса, кг м <sup>3</sup>                       | 1600—1700               | 1600—1700               | 2300—2400               | 2300—2400               |
| Прочность при кратковременном нагружении, МПа           |                         |                         |                         |                         |
| при сжатии                                              | 60—65                   | 70—80                   | 55—60                   | 70—90                   |
| при изгибе                                              | —                       | —                       | —                       | 15—25                   |
| при растяжении                                          | 5—5,5                   | 6—8,5                   | 2,5—3                   | 5—8                     |
| Модуль упругости при сжатии, МПа                        | (17—20)·10 <sup>3</sup> | (15—17)·10 <sup>3</sup> | 10·10 <sup>3</sup>      | (2,5—3)·10 <sup>4</sup> |
| Водопоглощение за 24 ч, %                               | 0,1—0,3                 | 0,05—0,2                | —                       | 0,05—0,3                |
| Морозостойкость—число циклов замораживания и оттаивания | 300                     | 300                     | 300                     | 500                     |
| Прочность температурных деформаций, град <sup>-1</sup>  | (10—14)·10 <sup>4</sup> | (13—19)·10 <sup>4</sup> | (10—14)·10 <sup>4</sup> | (10—12)·10 <sup>4</sup> |
| Линейная усадка, %                                      | 0,1—0,3                 | 0,2—0,3                 | 0,2—0,3                 | 0,1—0,3                 |

личных химических процессов, протекающих в полимерах под воздействием погодных условий.

Таким образом, использование полимербетонных конструкций при строительстве объектов в республиках Средней Азии весьма ограничено и допустимо после соответствующего технико-экономического обоснования, учитывающего при прочих равных условиях стойкость их к климатическому старению.

### 2.3. Бстонополимеры

Идея пропитки бетонов жидкими веществами, способными затем переходить в твердое состояние и тем самым кольтатировать его поровое пространство, выдвигалась многими учеными еще в 20-х годах нынешнего столетия. И это не случайно, так как капиллярно-пористое строение бетона существенно снижает его прочностные и структурные показатели.

Один из первых материалов, которые использовали для пропитки,— нефтяной битум. Предварительно его разжижают при на-

греве до температуры 120—140°C. В 1926 г. Никольсон осуществил пропитку битумом железобетонных свай, предназначенных для эксплуатации в морской воде [116]. Как показали дальнейшие наблюдения, сваи после 25 лет эксплуатации не имели признаков повреждения, тогда как аналогичные конструкции, защищенные окрасочной изоляцией, разрушились через 15—16 лет.

Большой объем исследований, проведенных С. Н. Попченко, Н. А. Мощанским, Н. С. Покровским, И. Касимовым [37, 62, 77, 78], позволил им детально осветить вопросы технологии пропитки бетонов в расплавах битумов. Ими предложены методы интенсификации пропитки бетона за счет создания избыточного давления и разрежения.

Использование битума в качестве одного из первых пропиточных материалов было обусловлено стабильностью его структуры, водонепроницаемостью, динамической прочностью, химической стойкостью и, главным образом, невысокой стоимостью.

Необходимо отметить, что основной задачей исследователей на первых порах было увеличение физико-механических показателей бетонов, прежде всего снижение его проницаемости, повышение коррозионной стойкости и морозостойкости [37].

Почти одновременно с битумом для пропитки бетонов начали использовать и петролатум. И. Касимов, исследуя пропитку бетона смесью битум — петролатум (в соотношении 1:4 и 2:1) и серой, установил, что при погружении бетонных образцов в расплав с температурой 120—130°C происходит интенсивное газовыделение, обусловленное испарением свободной воды и увеличением объема воздуха в порах бетона. Снижение температуры расплава до 80—90° способствовало прекращению газовыделения и проникновению расплава в поры бетона за счет образования там разрежения (конденсационного вакуума) [37].

А. Ю. Салимов [86] выявил возможность использования битумнозных материалов для пропитки железобетонных плит покрытия для придания им высоких гидроизоляционных свойств. Автор подобрал рациональный пропиточный состав для создания гидроизоляционного слоя в панелях покрытия, представляющий собой расплав смеси битума и петролатума (в соотношении 1:4), нагретый до температуры 110—120°C. Установлено, что пропитка плит на глубину 7—8 мм обеспечивает надежную гидроизоляцию.

Использование для пропитки бетона низкомолекулярного полиэтилена (НМПЭ) повышает его водонепроницаемость [37, 87]. При нагревании до температуры 90°C НМПЭ превращается в маслянистую жидкость и хорошо пропитывает бетон. Однако применение такую пропиточную изоляцию можно при температуре от —30 до +60°C.

Пропитка бетона лаком этиноль на глубину до 15 мм приводит к снижению водопроницаемости на 3—4 порядка, не вызывает коррозии арматуры, увеличивает прочность бетона в зависимости



от пористости на 25—75%, повышает сопротивление удару на 30—40% [37].

В целом такие пропиточные материалы на основе продуктов нефтепереработки, как битум, петролатум, парафин, главным образом, гидрофобизируют бетоны и практически не увеличивают его прочность.

Перспективным пропиточным термопластичным материалом считается сера. В работах отечественных и зарубежных исследователей [37, 90, 100] сообщается, что пропитка бетона расплавленной серой в 2—3 раза повышает его прочность, резко увеличивает морозостойкость и водонепроницаемость. Однако предстоит провести исследования по стабильности свойств таких бетонов.

Принципиально новым решением в технологии пропитки явилось использование для этих целей жидких маловязких мономеров и олигомеров, отверждающихся в поровом пространстве пропитанных бетонов.

В 1954 г. Г. А. Туркестанов использовал метод пропитки бетона стиролом для получения высокопрочного и высокоплотного материала [95]. Однако широкие исследования в области технологии бетонополимеров были начаты в СССР и за рубежом лишь в середине 60-х годов, когда перед конструкторами и технологами были поставлены требования по повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонных и железобетонных конструкций.

## Глава 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНОПОЛИМЕРОВ

### 3. 1. Общая схема получения бетонополимеров\*

Бетонополимеры — это материалы, получаемые пропиткой цементных бетонов высокомолекулярными составами с последующим их отверждением в поровой структуре бетонов. После заполнения порового пространства пропиточным составом и отверждения начинается его совместная работа с бетонной матрицей.

Технологический процесс получения бетонополимеров включает следующие стадии (см. блок-схему на рис. 1): 1) освобождение порового пространства бетона от воды и воздуха посредством сушки и вакуумирования; 2) приготовление пропиточного состава; 3) пропитка (иногда под избыточным давлением); 4) отверждение (термокаталитическим или радиационным).

Технологию получения бетонополимеров условно можно разделить на заводскую и полигонную. Заводскую технологию, включающую все перечисленные технологические стадии, как правило, используют для пропитки на всю глубину сборных бетонных и железобетонных изделий и конструкций в специальном оборудова-

\* Рассматривается пропитка бетона только полимеризующимися составами — мономерами метилметакрилат, стирол и их смесями.

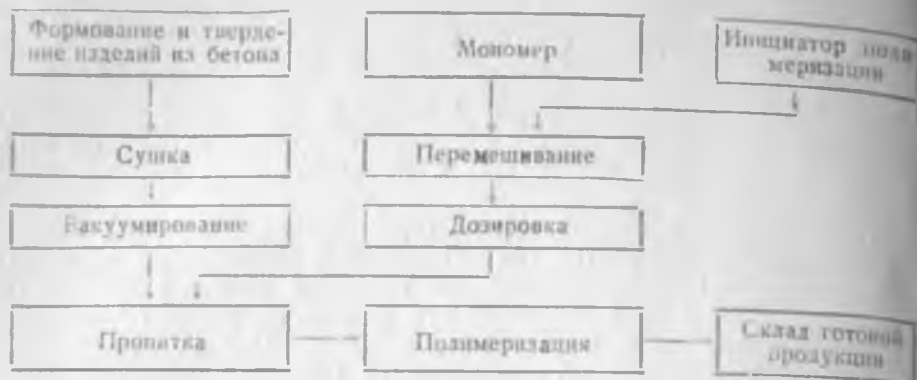


Рис. 1. Блок-схема производства изделий и конструкций из бетонополимеров.

нии, полигонную — для обработки пропиточными полимеризующимися составами поверхностей из монолитного и сборного бетона действующих сооружений и зданий. При этом достигается поверхностная пропитка бетона на глубину 5—20 мм. В отличие от заводской технологии в полигонной отсутствует стадия вакуумирования, а все остальные операции занимают меньше времени. Для обоих типов технологий требуется соответствующее нестандартное оборудование.

Завод бетонополимерных изделий и конструкций имеет отделение формования конструкций и изделий из бетона и отделение обработки их полимеризующимися составами, которое, в свою очередь, состоит из двух сушильных камер, холодильника, емкости для пропитки, емкостей с горячей водой, двух камер полимеризации, емкостей для приготовления и хранения пропиточного состава. Кроме того, в оборудование входят вакуумные насосы, компрессоры, ресиверы, топливный бак, системы приготовления и подачи пара, средства транспортировки, контроля и площадки складирования готовой продукции.

Производственный цикл состоит в следующем [98]. Отформованные бетонные изделия (до 25 м³) при помощи крана помещаются в сушильную камеру. После 10—24 ч сушки их постепенно охлаждают и направляют в пропиточный аппарат, который герметизируют и подключают к вакуумной линии. Через 0,5 ч вакуумирования в аппарат подают предварительно подготовленный пропиточный состав, содержащий мономер, инициатор и сшивающий агент. Процесс пропитки осуществляется в течение нескольких часов под избыточным давлением, создаваемым сжатым воздухом. После пропитки пропиточный состав удаляют из аппарата и подают в него горячую воду, под слоем которой протекает полимеризация мономера, находящегося в поровом пространстве бетонных изделий. После завершения полимеризации готовое бетонополимер-

ное изделие удаляют из полимеризационной камеры и перемещают на склад готовой продукции.

Таким образом, рассмотренная схема производства бетонополимеров значительно отличается от традиционного способа (заводского) изготовления бетонных и железобетонных изделий [47]. В производство бетонополимеров входит весь цикл производства бетонных изделий и конструкций, которые служат исходными полупродуктами для обработки их полимеризующимися составами. Каждая из операций технологического процесса обработки бетона этими составами более характерна для химического производства, чем промышленности строительных материалов. Действительно, операции сушки капиллярно-пористых материалов, вакуумирования, приготовления многокомпонентных пропиточных составов из химически активных мономеров и инициаторов, насыщения пористой неорганической фазы полимеризующимся составом с использованием вакуума, повышенного давления и, наконец, полимеризация «обычных» для химической технологии. Для осуществления таких процессов в химической промышленности создано специальное оборудование и выбраны рациональные режимы получения различных материалов. Использование опыта химической промышленности с учетом специфики строительной индустрии будет способствовать скорейшей разработке и внедрению прогрессивных технологий получения бетонополимеров.

Рассмотрим каждую из стадий технологической схемы получения бетонополимеров.

### 3.2. Требования к изделиям и конструкциям, предназначенным для пропитки

Процесс формования и твердения изделий и конструкций из бетонов, предназначенных для пропитки, почти не отличается от обычной технологии получения железобетона. Согласно [88], их изготавливают из тяжелых бетонов марок М200—М600 в соответствии с указаниями СНиП, а также «Инструкций» и «Руководств». При этом подвижность и жесткость бетонной смеси, а также способ уплотнения и режим твердения, которые к началу пропитки должны обеспечить не менее 70% марочной прочности исходного бетона не регламентируются. Для обработки конструкций и изделий, изготовленных из бетона расчетных марок М300—М400, рекомендуется  $B/C=0,45-0,5$ , позволяющее пользоваться оптимальными режимами сушки и пропитки. Состав исходного бетона подбирают в соответствии с требуемой проектной маркой бетонополимера: проектной марке бетонополимера М800 соответствует марка исходного бетона 200—250; М1000—1200; 1400—соответственно М250—350; 350—450, 450—600.

В качестве вяжущего бетона можно использовать портландцементы М300—М600 любого минералогического состава. Однако

не желательно применять пуццолановый цемент, так как бетон на его основе требует повышенного расхода пропиточного состава.

Следует ожидать, что в связи с получением высокопрочного материала любой крупный дефект в изделии резко снизит прочность изделия или конструкции из него. Поэтому бетонные изделия и конструкции, подготовленные для пропитки, не должны иметь раковин, выбоин и трещин. Перед пропиткой их следует тщательно заделывать.

Как было отмечено, пористость бетона хорошо колюматруется парафином, солидолом, воском, вазелином, петролатумом и другими материалами, которые в технологии сборного бетона часто используются в качестве разделительных для покрытия форм. Чтобы не допустить образования непроницаемого для пропиточного состава слоя на поверхности бетона при изготовлении бетонных изделий, предназначенных для пропитки, перечисленные материалы не следует использовать как антиадгезионные смазки. По этой же причине поверхность бетонных изделий, направляемых на пропитку, должна быть чистой и свободной от лакокрасочных, гидроизоляционных и других покрытий и загрязнений. В качестве антиадгезионных смазок форм и спалубки рекомендуются жидкие машинные масла, которые практически не влияют на проницаемость верхних слоев бетона.

### 3.3. Сушка бетона

Сушка бетонных изделий и конструкций при подготовке их к пропитке полимеризующимися составами необходима для освобождения порового пространства от воды. В то же время существует и опасность ранней сушки бетонов с несформировавшейся структурой [23]. В то же время для получения высокопрочных бетонополимеров необходимо использовать бетоны марок 200—600, поэтому в технологии бетонополимеров предусматривается сушка бетонов, у которых гидратация в основном завершилась.

Сушку капиллярно-пористых материалов, т. е. бетонов, можно представить в виде связанных между собой процессов перемещения влаги внутри материалов, изменения ее агрегатного состояния (парообразования) и удаления с поверхности высушиваемого изделия в окружающую среду. Согласно классификации А. В. Лыкова [43], вода может быть связана с твердыми веществами, в зависимости от энергии связи, химическим, физико-химическим и физико-механическим способами.

Химически связанная вода наиболее прочно удерживается в веществе ионными или молекулярными связями. В бетоне она содержится в кристаллогидратах, образующихся при гидратации клинкерных частиц. Количество химически связанной воды определяется стехиометрическими соотношениями для каждого вида компонентов цемента и удаление ее связано, как правило, с разрушением химической структуры, которая у кристаллогидратов

цементного камня устойчива при нагреве до  $100-150^{\circ}$  [67]. В процессе сушки при подготовке бетона к пропитке нет необходимости удаления химически связанной воды, поэтому процесс нами не рассматривается.

Физико-химически связанная вода удерживается на внутренней поверхности пор и капилляров адсорбционными силами. Для бетона, имеющего сильно развитую внутреннюю поверхность (до  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ ), этот вид связи влаги является одним из основных. Энергия такой связи  $W$ , т. е. работа адсорбции выражается соотношением [97]

$$\bar{W} = RT \ln(p_0/p),$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $p_0$  и  $p$  — давление насыщенного пара и равновесное давление пара.

Большую энергию связи с поверхностью имеет первый мономолекулярный слой, связанный вандерваальсовыми силами, меньшую — каждый последующий слой. При радиусах капилляра меньше  $10^{-1}$  мкм адсорбционные слои могут смыкаться и полностью заполнять весь объем капилляра. Таким образом, чем меньше радиус капилляров, тем прочнее вода, заполняющая их, связана с их стенками.

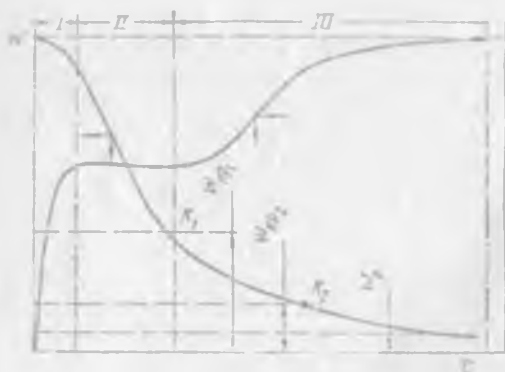
Физико-механическая связь воды наблюдается в крупных порах и капиллярах за счет избыточного капиллярного давления, а также на поверхности при соприкосновении тела с жидкостью. Энергия ее значительно меньше энергии физико-химической связи, и ее удаление при термической сушке требует энергозатрат, приблизительно равных теплоте парообразования воды.

При сушке бетона следует удалять влагу, связанную физико-химически и физико-механически. Капиллярно-пористое тело, находящееся в равновесии с окружающей средой, может иметь в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха ( $\varphi$ ) и температуры различное равновесное влагосодержание ( $u$ ), которое изображается кривой  $u = f(\varphi)$ .

Влагосодержание тела, находящегося в контакте с полностью насыщенным воздухом ( $\varphi = 1$ ), называют гигроскопическим [43, 84], поэтому необходимые условия для процесса сушки — разность парциальных давлений паров непосредственно над поверхностью высушиваемого материала и окружающего воздуха, а также разность температур среды и поверхности (температурный напор), обеспечивающая приток тепла от теплоносителя, необходимого для фазового перехода влаги. Испарившаяся влага удаляется с поверхности материала, в результате по толщине создается градиент влажности, обуславливающий перемещение влаги из глубинных слоев поверхности и общее снижение ее содержания.

Цикл сушки капиллярно-пористого материала условно делят на три периода [43, 74]: первый период (рис. 3.2) характеризуется прогревом всего изделия до температуры сушки, началом испарения

рения поверхностной влаги, второй следует за первым, температура по толщине материала повышается до показания мокрого термометра психометра, а влага испаряется с постоянной скоростью. На рис. 3.2 этот участок сушки характеризуется практически прямолинейным участком вплоть до точки  $K_1$ , называемой первой критической точкой, после которой угол наклона кривой к оси времени постепенно уменьшается. Третий период, называемый периодом убывающей скорости сушки, начинается от точки  $K_1$  и характеризуется непрерывным замедлением процесса удаления влаги из тела, а также повышением его температуры. В третьем периоде можно выделить два участка:  $K_1—K_2$ , на котором испарение происходит в основном с поверхностных слоев материала, и участок после точки  $K_2$  (называемой второй критической точкой),



на котором температура поверхностных слоев быстро повышается до температуры теплоносителя, а зона испарения перемещается в глубь материала.

Особенности сушки бетона — изменение соотношения между микро- и

Рис. 3.2. Кривая влагоотдачи пористого тела.

макропористостью, сопровождающее удаление влаги, а также возникновение микро- и макродефектов вследствие деструктивных процессов и усадки цементного камня [67, 104]. К. Д. Некрасов, В. В. Жуков и В. Ф. Гуляев [67] тщательно изучили вопросы первого нагрева тепловых агрегатов из жаростойких бетонов. Однако закономерности сушки, выявленные авторами для жаростойких бетонов, можно с достаточной степенью точности распространить на обычные бетоны, сушку которых проводят при температурах до  $200^{\circ}\text{C}$ . Из приведенных в табл. 3.1 данных об изменении дифференциальной и интегральной пористости при нагреве жаростойкого бетона на портландцементе, содержащего тонкомолотую добавку, видна тенденция увеличения количества пор с  $r > 3 \cdot 10^{-6}$  см при прогреве до  $200^{\circ}$ . Увеличение температуры нагрева приводит к дальнейшему изменению порового пространства бетонов вследствие дегидратации кристаллогидратов цементного камня и реакций между его составляющими. Следует отметить сравнительно небольшое изменение общей пористости при нагреве бетона от  $110$  до  $200^{\circ}$  и выше. Оно показывает, что сушка и сопровождающие ее структурные изменения бетона не увеличивают расход пропиточного состава. При этом изменение объема пор при сушке будет тем незначительнее, чем большая доля в

составе бетона приходится на заполнитель, который не меняет объема при нагреве. Интересны данные [67] об изменении количества дефектов в единицу времени ( $\Delta\Sigma C/\Delta t$ ) при нагреве жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе (рис. 3.3). Наибольшая скорость возникновения микро- и макродефектов приходится на область температур 100—300°, т. е. на период сушки, когда удаляется влага, удерживаемая физико-механическими и физико-химическими связями. При этом деформации расширения

Таблица 3.1

Количество капилляров с  $r > 3 \cdot 10^{-6}$  см на 1 см<sup>2</sup> поверхности бетона в зависимости от температуры нагрева

| Вид бетона, соотношение портланд-цемента (Ц) и тонкомолотой доломит (Д) | Количество капилляров ( $\Lambda \times 10^{-9}$ ) на 1 см <sup>2</sup> при температурах нагрева, °С |          |          |          |          |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                                                                         | 110                                                                                                  | 200      | 400      | 600      | 800      |
| Ц:Д=1:0,3 пропаривание                                                  | 4,2 0,34*                                                                                            | 4,8 0,33 | 3,9 0,32 | 4,7 0,34 | 3,1 0,38 |
| Ц:Д=1:1 пропаривание                                                    | 5,4 0,32                                                                                             | 7,0 0,36 | 6,6 0,37 | 6,3 0,36 | 2,0 0,4  |
| Ц:Д=1:0,3 нормальное твердение                                          | 3,1 0,37                                                                                             | 3,0 33   | 3,5 0,37 | 3,9 0,37 | 2,4 0,43 |
| Ц:Д=1:1, нормальное твердение                                           | 5,0 4                                                                                                | 5,6 0,43 | 5,2 0,32 | 5,5 0,38 | 5,1 0,43 |

\* Цифра в числителе — количество капилляров на 1 см<sup>2</sup>, в знаменателе — интегральная пористость, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

и усадки, сопровождающие сушку бетона, в значительной степени зависят от развития и появления дефектов в структуре цементного камня, обнаруживаемых акустическим способом [114].

Таким образом, при создании конструкций из бетонополимеров следует учитывать большие изменения, происходящие в структуре бетона, которые возникают при сушке, вызывают деформации бетона и образование дефектов.

В работах [38, 58, 67, 114] описаны деформационные процессы, сопровождающие процессы сушки бетонов и конструкций из них. Отмечено, что деформации бетона на разных стадиях его прогрева имеют свои значения, в связи с чем коэффициент линейного расширения рекомендуется [67] принимать дифференцированно для каждого температурного интервала. Деформации бетона особенно опасны в армированных элементах, так как вследствие стесненной усадки в бетоне могут возникать трещины, в результате может резко снизиться несущая способность конструкций после обработки их полимеризующимися составами.

Исследования тепло- и массопереноса в бетоне, проведенные В. В. Жуковым и В. В. Перегудовым [25], В. Г. Петровым-Денисовым [73], показали, что в результате испарения воды парциальное давление в порах бетона становится больше давления

наружного воздуха, но, несмотря на происходящий фильтрационный перенос, возникающий при этом градиент давления остается больше нуля вследствие гидродинамического сопротивления, оказываемого этому переносу скелетом бетона.

Наличие градиента давления по толщине бетона служит причиной возникновения интенсивного переноса пара по типу движения газов через пористые среды, а градиенты давлений внутри пор вызывают перемещения самих жидкостей. Однако эти виды переноса

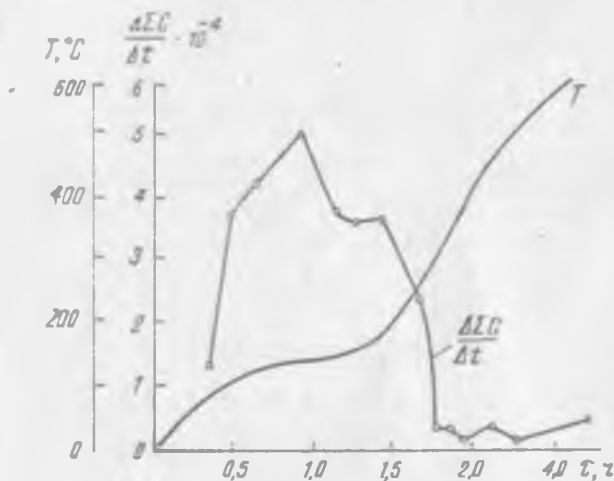


Рис. 3.3. Изменение количества дефектов  $\Sigma_c$  в единицу времени ( $\Delta \Sigma_c / \Delta t$ ) при нагреве бетона с керамзитовым заполнителем ( $\mu/\alpha=0,5$ ,  $C:D=1:0,7$ ).

са находятся в зависимости от размеров капилляров: чем меньше их радиус, тем большее давление необходимо для движения по ним пара или жидкости. Например, чтобы протолкнуть воду через капилляр с  $r=10^{-7}$  см, необходимо давление 16,7 МПа, а для испарения воды в этом капилляре требуется температура 340°C. Роль пористости бетона в фильтрации газов и жидкостей, протекающей при комнатных температурах, подробно описана в [62, 92, 103]. Однако во время сушки, протекающей при высоких температурах, сложные процессы тепло- и массопереноса, накладываясь друг на друга по толщине бетона, создают трудно моделируемую картину, не поддающуюся описаниям математическими методами, что осложняет выбор режима сушки и приводит к возникновению дефектов и даже разрушению бетона.

Для правильного выбора сушки и устранения разрушения бетона необходим учет температурных деформаций бетона  $\epsilon_T$ , деформаций ползучести  $\epsilon_w$  и деформаций, связанных с изменением модуля упругости при нагреве в интервале температур  $\Delta T$ .



Предложенная в работе В. В. Жукова и Б. Райнхарта [26] формула позволяет определить допускаемые скорости ( $v_T$ ) нагрева бетонных изделий и конструкций при сушке с учетом следующих факторов:

$$v_T = \frac{\frac{1}{3} \cdot \eta \sigma_{сж}^{кр}}{(\alpha_{бр} - K) \frac{\sigma_{сж}^{кр}}{\Delta T} \frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\beta_i \beta_{i+1}}}, \quad (3.1)$$

где  $\eta$ ,  $\alpha_{бр}$  и  $K$  — коэффициенты, учитывающие вид заполнителя и вяжущего;  $\sigma_{сж}^{кр}$  — допустимые сжимающие напряжения в бетоне, при которых образуется трещина, определяемые экспериментально и равные примерно  $0,4 \cdot R_{пр}$ ;  $\beta_i$  и  $\beta_{i+1}$  — коэффициенты, учитывающие изменения модуля упругости соответственно при нагреве до температур  $T_i$  и  $T_{i+1}$ ;  $\Delta T = T_{i+1} - T_i$ .

В технологии бетонополимеров сушке подвергают бетонные изделия, отличающиеся размерами, составами бетона и его структурой, схемой армирования и другими параметрами. В связи с тем, что сушка — наиболее продолжительная и энергоемкая стадия, выбор способа и режима ее весьма ответственная операция. Ее назначение состоит в том, чтобы с учетом свойств высушиваемого материала, а также возможностей имеющегося оборудования обеспечить максимальные скорости сушки при минимальных энергозатратах с сохранностью целостности конструкции.

Формула (3.1), как уже отмечалось, позволяет выбрать допускаемые скорости нагрева на различных стадиях сушки. Продолжительность сушки  $\tau$ , описанная кривой влаготдачи (см. рис. 3.2), может быть вычислена по формуле (3.2), приведенной в [25], если известны начальное ( $u_n$ ), критическое ( $u_{кр}$ ), конечное ( $u_k$ ) и равновесное ( $u_p$ ) влагосодержания, а также скорость сушки во втором периоде  $v_T$ :

$$\tau = \frac{1}{v_T} \left[ (u_n - u_{кр}) + (u_{кр} - u_p) \ln \frac{u_{кр} - u_p}{u_k - u_p} \right]. \quad (3.2)$$

Предложена также эмпирическая формула для определения продолжительности сушки в зависимости от исходной влажности бетона ( $u_i$ ) и температуры сушки  $t$  [76]:

$$\tau = \left( \frac{A}{u_i^a} t - \frac{B}{u_i^b} \right)^{-1} K, \quad (3.3)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $b$  — коэффициенты, числовые значения которых определяют из опыта;  $K$  — коэффициент моделирования для изделий, имеющих формы куба, равный 1, формы плиты — 1,3.

Сравнивая формулы (3.2) и (3.3), нетрудно убедиться, что выражение (3.2) записано в более общем виде и лучше соответ-

ствует кривой влагоотдачи капиллярно-пористого тела (см. рис. 3.2). Режимы сушки окончательно регулируют при выпуске опытно-промышленных партий конкретных бетонополимерных изделий.

Известны конвективный, контактный, вакуумный, радиационный, высокочастотный, индукционный и др. способы сушки. Наибольшее распространение в промышленности строительных материалов получил конвективный способ сушки, в котором влага удаляется в результате контакта сухого нагретого теплоносителя с поверхностью влажного материала. В качестве теплоносителя контактирующего с бетоном в промышленных сушильных установках, могут быть использованы воздух и не содержащие масляни-

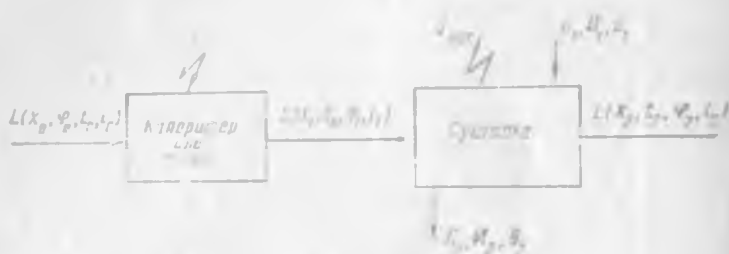


Рис. 3.4. Общая схема сушильной установки

тых отходов сгорания топочные газы, которые одновременно служат переносчиками водяных паров, испарившихся из влажного материала. Несмотря на дешевизну и простоту получения, топочные газы могут применяться в технологии бетонополимеров только при полном исключении их контакта с парами горючих мономеров, который может послужить источником пожара.

Общая схема сушильной установки (рис. 3.4) включает источник тепла, сушильную камеру и вентилятор [39, 44]. Установка может работать периодически или непрерывно. При периодической работе в сушилку загружают определенное количество влажного бетона  $G_1$  и после окончания сушки выгружают материал с массой  $G_2$ . В непрерывном процессе в сушильную установку загрузку и выгрузку материала производят постоянно.

Общее количество ( $W$ ), удаленное из материала,

$$W = G_1 - G_2. \quad (3.4)$$

Если известны начальная ( $u_1$ ) и конечная ( $u_2$ ) влажности бетона (в %), то количество влаги, удаленное в сушилке,

$$W = G_1 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_1}, \quad (3.5)$$

если  $u_1 \gg u_2$ , а  $u_2$  близко к нулевой влажности, то выражение (3.5) примет вид:

$$W = G_1 \frac{w_1}{100} \quad (3.6)$$

Для тяжелых бетонов марок М200—400 величина  $w_1$  после твердения составляет обычно 5—10%, в то время как после сушки  $w_2$  не должна превышать 0,5% [78].

Зная производительность сушильной установки по испарению влаги ( $W$ ) и влагосодержание теплоносителя на входе ( $x_1$ ) и выходе из сушилки ( $x_2$ ), можно определить расход газообразного теплоносителя  $L$ :

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (3.7)$$

Количество тепла  $Q$ , содержащееся в теплоносителе, пропорционально его расходу  $L$  и разности энтальпий ( $i$ ) в начале и конце процесса [44, 73, 74]. Общий расход тепла для конвективной сушки нагретым теплоносителем рассчитывают по уравнению

$$Q = Q_{\text{нгр}} + Q_{\text{у.г}} + Q_{\text{тр}} - W c_w \theta_1 + Q_{\text{пот}}, \quad (3.8)$$

где  $Q = L(i_1 - i_0)$  — количество теплоты, затраченное на нагрев воздуха с энтальпии  $i_0$  до энтальпии  $i_1$ ;  $Q_{\text{нгр}} = G_2 c_2 (\theta_2 - \theta_1)$  — количество теплоты, расходуемое на нагревание материала с температуры  $\theta_1$  до температуры сушки  $\theta_2$ ,  $c_2$  — теплоемкость сухого материала;  $Q_{\text{у.г}} = L(i_2 - i_0)$  — количество теплоты, содержащейся в уходящих газах;  $i_2$  — энтальпия отработанного теплоносителя;  $Q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} (\theta_2 - \theta_0)$  — потери теплоты, идущей на нагрев транспортирующих устройств, масса которых  $G_{\text{тр}}$  и теплоемкость  $c_{\text{тр}}$ ;  $W c_w \theta_1$  — теплота, содержащаяся в воде до ее испарения из материала;  $c_w$  — теплоемкость воды;  $Q_{\text{пот}}$  — потери теплоты в окружающую среду через стенки и другие части сушилки.

Потери в окружающую среду пропорциональны разности температур среды и сушилки, а также скорости движения теплоносителя. В промышленных сушилках величина  $Q_{\text{пот}}$  обычно составляет 5—7% общего расхода теплоты  $Q$ .

В работах [25, 26] указывается, что скорость удаления влаги из бетонных конструкций должна быть подобрана с учетом их размеров, насыщенности арматурой, конфигурации и состава бетона. Для соблюдения этих условий сушки параметры теплоносителя, поступающего в сушилку, можно широко варьировать. Например, мягкие условия сушки могут быть созданы путем подмешивания к атмосферному воздуху части отработанного теплоносителя (рециркуляция) или посредством ступенчатого подогрева теплоносителя [43, 44, 74, 89]. В обоих случаях расходы воздуха и тепла не изменяются, однако скорости сушки замедляются, что приводит к увеличению размеров сушильного оборудования.

Из конвективных сушилок, применяемых на относительно малотоннажных производствах конструкций и изделий из бетонополимеров, более эффективны камерные циркуляционные периодического действия, так как они имеют более простую конструкцию и меньшие габариты, чем непрерывного действия. Нагрев теплоносителя для обеспечения их работы можно осуществлять строительными воздушнонагревателями, разработанными отечественной промышленностью [63, 64], осуществляющими выработку как топочных газов (топливные нагреватели УСВ-30, ЭВП-10), так и горячего воздуха (паровые и электрические калориферы).

В контактных сушилках обогрев высушиваемых изделий осуществляется при их непосредственном контакте с горячей стенкой сушилки. Примером такого оборудования в технологии бетона могут служить индукционные камеры, используемые для пропарки центрифугированных конструкций. В этих камерах происходит нагрев стальной формы, а также арматуры, в результате бетонная смесь разогревается и происходит ее твердение. Продолжение нагрева после твердения обеспечивает сушку бетонного изделия при соответствующих температурах.

Основные недостатки контактных сушилок — трудность обеспечения большой поверхности контакта разогретой стенки сушилки с изделием сложной конфигурации и снижение скорости сушки в результате одностороннего удаления влаги только с открытой поверхности.

Сушилки вакуумного типа целесообразно использовать для увеличения скорости процесса удаления влаги и снижения температуры сушки. Из-за периодического режима работы они имеют небольшую производительность, кроме того, требуют повышенных затрат ручного труда, поэтому в промышленности широко не применяются. В технологии бетонополимеров, носящей периодический характер, применение вакуума для сушки принципиально допустимо и может быть эффективно в период снижения скорости сушки бетона [75], однако из-за сложности процесса его использование должно быть ограничено случаями, когда конвективная сушилка не может сохранить целостность высушиваемой конструкции.

Радиационная сушка бетона происходит при нагреве его поверхности инфракрасными и другими излучателями тепла. В связи со сложностью обеспечения равномерного прогрева бетона на глубину 2—3 см с использованием лишь излучения, а также повышенного удельного расхода энергии радиационная сушка может быть рекомендована только для тонкостенных изделий (трубы, лотков, плит) и поверхностной обработки бетона. В строительстве широко распространены для сушки поверхностей зданий терморadiационные калориферы типа БИС-10, БИК-15 [79], которые можно приспособить и для сушки бетонных изделий в технологии бетонополимеров. В условиях сухого жаркого климата простым и эффективным является способ сушки бетона с использованием солнечной радиации.

При пропускании переменного электрического поля через материал внутренние слои бетона нагреваются быстрее и до более высоких температур, чем наружные, что приводит к высоким скоростям удаления влаги. Недостатки этого метода — сравнительно сложное аппаратное оформление процесса и большие расходы электроэнергии.

Независимо от применяемого метода сушка должна обеспечивать удаление влаги до остаточного содержания не более 0,5% массы изделия. В соответствии с рекомендациями [83], конструкция сушильной установки должна обеспечивать свободную загрузку и выгрузку изделий, а также равномерный их прогрев до температуры 110—150°C без местных перегревов, превышающих 250°C, которые приводят к появлению трещин. Если бетонополимеру необходимо придать специальные (например, электроизолирующие) свойства, то процесс сушки можно проводить при более высоких температурах. Между поверхностями соседних изделий, размещенных в сушильной камере, должны быть предусмотрены зазоры не менее 10 мм, обеспечивающие равномерное смывание теплоносителем всех поверхностей высушиваемых изделий. Режим сушки подбирают опытным путем для каждого изделия в зависимости от конструкции сушильной камеры, габаритов и конфигурации изделий, а также состава бетона.

Для контроля степени сушки могут быть использованы как приборы, осуществляющие непрерывное измерение влажности в изделии, так и весовые методы на образцах-кубах с ребром, размер которого равен максимальной толщине изделия. Перед началом сушки четыре грани такого куба изолируют с помощью фольги или термостойкого покрытия (типа эпоксидной смолы), оставляя свободными две противоположные грани. После отверждения покрытия кубы помещают в сушильную камеру одновременно с партиями изделий и взвешивают их через каждые 2 ч. Процесс сушки считают законченным, если масса контрольных кубов не будет изменяться в течение 2 ч.

После сушки бетонные изделия, имеющие повышенную температуру, должны быть плавно охлаждены до температуры 30—35°, с этой целью их рекомендуется выдерживать в производственном помещении при температуре 10—20° в течение 2—3 ч. Это необходимо для предотвращения разогрева и преждевременной полимеризации пропиточного состава на стадии пропитки, которая следует за сушкой.

### 3. 4. Вакуумирование бетонных изделий

Основная задача технологии бетонополимеров — заполнение полимером порового пространства бетона, которое прежде всего необходимо освободить от воды и воздуха. Если при сушке из пор бетона удаляется вода, то при вакуумировании — воздух.

По литературным данным, количество поглощенного мономера (метилметакрилата) у бетона, откавакумированного до остаточного давления 1—10 мм рт. ст., по сравнению с невакуумированным увеличивается на 30%, что приводит к двойному возрастанию прочности бетонополимера. Глубина и продолжительность вакуумирования бетона перед пропиткой — главные факторы, влияющие на скорость и качество пропитки. Для описания процессов массопереноса газов в пористых телах часто пользуются закономерностями, выведенными для диффузионных потоков. Согласно первому закону Фика, плотность установившегося диффузионного потока  $j$  (кг/см<sup>2</sup>) пропорциональна градиенту концентрации движущихся молекул:

$$j = -D \operatorname{grad} c, \quad (3.9)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В результате вакуумирования пористого тела, имеющего толщину много большую величины свободного пробега молекул газа, движущей силой перемещения газа будет разность давлений газа  $p$  в центре образца и на его поверхности. В таком случае для плоского слоя уравнение (3.10) примет следующий вид:

$$j = v\rho = -\frac{D}{RT} \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (3.10)$$

где  $v$  — скорость движения газа, м/с;  $\rho$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура, °С.

Основным критерием, характеризующим движение газа в вакууме, является критерий Кнудсена, который представляет собой отношение средней длины свободного пробега молекул газа  $\Lambda$  к размеру сосуда  $d$ :

$$Kn = \frac{\Lambda}{d}. \quad (3.11)$$

Если величина  $Kn \gg 1$ , режим течения газа — молекулярный, если  $Kn \ll 1$  — вязкостный; промежуточное состояние газа при  $Kn = 0,02$ —2 называют молекулярно-вязкостным.

По кинетической теории газов, длина свободного пробега  $\Lambda$  молекул выявляется по их числу в единице объема  $n$  и по диаметру  $d_m$ . Для газа, имеющего одинаковые молекулы,  $\Lambda$  определяется, согласно [108], по формуле

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_m^2 n}. \quad (3.12)$$

Длину среднего свободного пробега  $\Lambda'$  молекулы газа массой  $m_1$  в смеси двух газов можно найти из выражения

$$\frac{1}{\Lambda'} = \pi \sqrt{2} n_1 d_{m_1}^2 + \pi n_2 d_{m_2}^2 \sqrt{1 + \frac{m_2}{m_1}}, \quad (3.13)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры молекул первого и второго газов;  
 $m_2$  — масса молекулы второго газа.

Если известно давление воздуха  $p$  (мм рт. ст.), состоящего в основном из кислорода и азота,  $\Lambda_v$  можно при  $20^\circ$  приближенно определить из выражения:

$$V_v = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{p} \quad (3.14)$$

С помощью формул (3.11) и (3.14) определим механизмы переноса газа в капиллярах различных размеров при вакуумировании

Таблица 3.2

Значение чисел Кн для капилляров различного радиуса (мм) при вакуумировании бетона

| Давление,<br>мм рт. ст. | $10^{-3}$           | $10^{-5}$           | $10^{-7}$           | $10^{-9}$        |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 0.01                    | 0.5                 | $2.5 \cdot 10^2$    | $2.5 \cdot 10^4$    | $2.5 \cdot 10^6$ |
| 0.1                     | 0.25                | $2.5 \cdot 10$      | $2.5 \cdot 10^3$    | $2.5 \cdot 10^5$ |
| 1                       | $2.5 \cdot 10^{-2}$ | 0.5                 | $2.5 \cdot 10^2$    | $2.5 \cdot 10^4$ |
| 10                      | $2.5 \cdot 10^{-3}$ | 0.25                | $2.5 \cdot 10$      | $2.5 \cdot 10^3$ |
| 100                     | $2.5 \cdot 10^{-4}$ | $2.5 \cdot 10^{-2}$ | 2.5                 | $2.5 \cdot 10^2$ |
| 760                     | $3.3 \cdot 10^{-5}$ | $3.3 \cdot 10^{-3}$ | $3.3 \cdot 10^{-1}$ | $3.3 \cdot 10$   |
| 3040                    | $8.2 \cdot 10^{-6}$ | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | $8.2 \cdot 10^{-2}$ | 8.2              |

нии бетона. Как видно из данных табл. 3.2, значение числа Кнудсена (Кн) может меняться в зависимости от давления и поперечного размера капилляра в очень большом диапазоне — от  $10^{-6}$  до  $10^6$ , что отражается при вычислении коэффициентов диффузии. В то же время классификацию режимов переноса газа в бетоне [102], на наш взгляд, не следует распространять на процессы вакуумирования, которые имеют принципиальные отличия особенно при повышенном атмосферном и пониженном давлениях.

В связи с тем, что в бетоне имеются капилляры различных размеров, можно предполагать, что откачка воздуха из различных частей образца будет проходить неравномерно, даже при быстром выравнивании давления по всему откачиваемому объему. Например, микротрещины, контактная зона растворной части с крупным заполнителем и некоторые другие участки бетона, имеющие относительно более крупные поры, будут дегазироваться по механизмам, которые отличаются от механизмов, характерных для цементного камня. Если в процессе вакуумирования между открытой поверхностью и внутренними слоями дегазируемого объема возникнет градиент давления ( $dp/dx$ ), то и механизмы переноса по толщине образца изменятся.

Рассмотрим характер распределения давления воздуха внутри пористого тела при его одностороннем вакуумировании. Запишем уравнение баланса газа, полагая процесс изотермическим:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{\rho_0} v_r \rho_0 \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{\rho_0} \rho_0 \Pi + \frac{A B p}{1 + A p} \right) = 0, \quad (3.15)$$

где — левый член уравнения характеризует объем истекающего газа, правый — свободную и адсорбированную фазы дегазированной части образца;  $x$  — расстояние от дегазируемой поверхности с давлением  $p$  до точки тела, имеющей давление  $p$ ;  $\Pi$  — пористость;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность газа в точке  $x$ ;  $\rho_0$  — исходная плотность газа при давлении  $p_0$ ;  $A$  и  $B$  — постоянные в уравнении адсорбции Генри;  $v_r$  — скорость истечения газа.

При вакуумировании дегазируемая зона будет перемещаться вглубь образца. Будем считать границей дегазации расстояние  $x_r$ , на котором  $p = p_0$ .

Согласно приближенному методу последовательной смены стационарных состояний [31], который авторы предложили использовать для расчета внутренней задачи дегазации [31], будем иметь

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{p}{\rho_0} \rho_0 v_r \right) = 0, \quad (3.16)$$

где  $p = p_0$  при  $x = 0$  и  $p = p_0$  при  $x = x_r$ :

$$x = f(t) = x_{rp}(t),$$

откуда после интегрирования получим

$$\frac{p}{\rho_0} \rho_0 v_r = -c_1, \quad (3.17)$$

Из соотношения (3.10) выделим  $v_r$  и после подстановки его в (3.17) получим:

$$\frac{p dp}{dx} = c_2, \quad \text{где } c_2 = \frac{c_1 p_0 R T}{D}.$$

Интегрируя в пределах от 0 до  $x$  и от 0 до  $x_{rp}$ , а также от  $p_0$  до  $p$  и от  $p_0$  до  $p_0$ , и имея ввиду, что при  $x=0$   $p=p_0$ , а при  $x=x_{rp}$   $p=p_0$ , получаем:

$$\frac{\int_0^x c_2 dx}{\int_0^{x_{rp}} c_2 dx} = \frac{\int_{p_0}^p p dp}{\int_{p_0}^{p_0} p dp},$$

откуда

$$\frac{x}{x_{rp}} = \frac{p^2 - p_0^2}{p_0^2 - p_0^2}. \quad (3.18)$$

Выражение (3.18) описывает распределение давления газа в динамическом потоке при одностороннем вакуумировании пористого тела. Пользуясь им, можно определить распределение давления газа в зависимости от положения движущейся границы  $x_{rp}$ , которая, в свою очередь, зависит от времени.

На рис. 3.5 приведены кривые, рассчитанные по (3.18), зависимости  $p/p_0$  от  $x/x_{rp}$ , которые для всех степеней разряжения носят выпуклый характер. Это означает, что в случае прекращения

в какой-то момент вакуумирования к началу пропитки оставшийся в объеме образца воздух будет распределен в соответствии с закономерностью, описываемой формулой (3.18) и отраженной на рис. 3.6. Он оказывает сопротивление движению

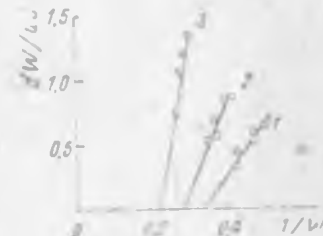
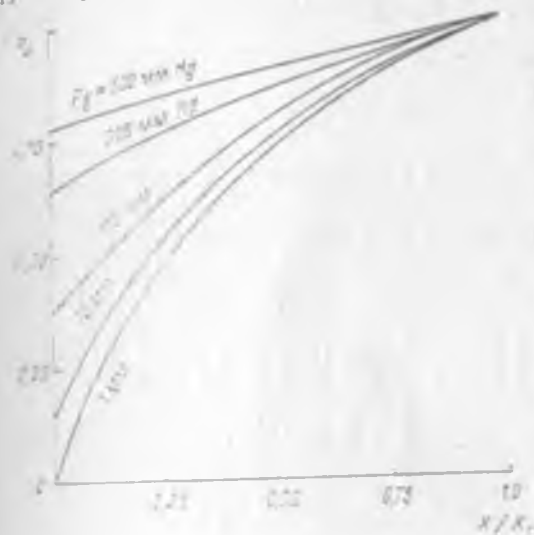


Рис. 3.5. Распределение давления в образце бетона в процессе вакуумирования

Рис. 3.6. Связь между проницаемостью и скоростью насыщения при пропитке бетона ММА:

1 —  $B/\Pi = 0,3$ ; 2 —  $B/\Pi = 0,4$ ; 3 —  $B/\Pi = 0,5$ .

пропиточной жидкости. С другой стороны, распределение давления газа по толщине дегазируемого образца будет определять механизм переноса этого газа. Так, для капилляров радиусом  $10^{-5}$  м при давлении на дегазируемой поверхности  $p_0 = 1$  мм рт. ст. механизм переноса будет молекулярным ( $K_p = 2,5$ ), на расстоянии  $x$ , где давление  $p = 10$  мм рт. ст. — молекулярно-вязкостным ( $K_p = 0,25$ ), на границе дегазации ( $x_{rp}$ ), где  $p_0 = 760$  мм рт. ст., вязкостным ( $K_p = 3,3 \cdot 10^{-3}$ ). Аналогично изменяются механизмы переноса в одном и том же сечении, но в капиллярах разного размера.

Оценим значения коэффициентов диффузии ( $D$ ) при вакуумировании бетона для различных механизмов переноса.

Для вязкостного потока величина  $D$  определяется по уравнению Козени—Кармана [16]:

$$D = \frac{\Pi^3}{K \eta s_{ya}^2} \bar{p} = \frac{\Pi^3}{19 K \eta} \bar{p}, \quad (3.19)$$



где  $p$  — среднее давление равное 0,05 МПа;  $P$  — пористость бетона;  $d$  — диаметр капилляра, м;  $\eta$  — вязкость воздуха при 20° и 0,05 МПа, равная  $18,1 \cdot 10^{-6}$  н·с/м<sup>2</sup>;  $K$  — коэффициент извилистости, принимаемый для бетона в соответствии с [43] равным 10;  $s_{уд}$  — удельная площадь поверхности.

Коэффициент диффузии для молекулярного потока вычисляется по формуле

$$D = \frac{2}{3K} P d \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}}, \quad (3.2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура, К;  $M$  — молекулярная масса.

Таблица 3.3

Коэффициенты диффузии воздуха в капиллярах цементного камня

| Цементный камень |      | Механизм переноса воздуха | Коэффициент диффузии (м <sup>2</sup> /с) для капилляров радиусом (м) |                      |                      |                      |
|------------------|------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| В/Ц              | П    |                           | 10 <sup>-3</sup>                                                     | 10 <sup>-5</sup>     | 10 <sup>-7</sup>     | 10 <sup>-9</sup>     |
| 0,3              | 0,25 | Вязкостный                | 4,3                                                                  | $4,3 \cdot 10^{-4}$  | $4,3 \cdot 10^{-8}$  | $4,3 \cdot 10^{-12}$ |
|                  |      | Молекулярный              | $1,5 \cdot 10^{-2}$                                                  | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | $1,5 \cdot 10^{-6}$  | $1,5 \cdot 10^{-8}$  |
|                  |      | Молекулярно-вязкостный    | 4,31                                                                 | $5,6 \cdot 10^{-4}$  | $1,3 \cdot 10^{-6}$  | $1,27 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,4              | 0,35 | Вязкостный                | 6,0                                                                  | $6,0 \cdot 10^{-4}$  | $6,0 \cdot 10^{-8}$  | $6,0 \cdot 10^{-12}$ |
|                  |      | Молекулярный              | $2,1 \cdot 10^{-2}$                                                  | $2,1 \cdot 10^{-4}$  | $2,1 \cdot 10^{-6}$  | $2,1 \cdot 10^{-8}$  |
|                  |      | Молекулярно-вязкостный    | 6,02                                                                 | $6,8 \cdot 10^{-4}$  | $1,84 \cdot 10^{-6}$ | $1,78 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,5              | 0,43 | Вязкостный                | 7,4                                                                  | $7,4 \cdot 10^{-4}$  | $7,4 \cdot 10^{-8}$  | $7,4 \cdot 10^{-12}$ |
|                  |      | Молекулярный              | $2,5 \cdot 10^{-2}$                                                  | $2,5 \cdot 10^{-4}$  | $2,5 \cdot 10^{-6}$  | $2,5 \cdot 10^{-8}$  |
|                  |      | Молекулярно-вязкостный    | 7,42                                                                 | $9,5 \cdot 10^{-4}$  | $2,2 \cdot 10^{-6}$  | $2,13 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,6              | 0,49 | Вязкостный                | 8,5                                                                  | $8,5 \cdot 10^{-4}$  | $8,5 \cdot 10^{-8}$  | $8,5 \cdot 10^{-12}$ |
|                  |      | Молекулярный              | $2,9 \cdot 10^{-2}$                                                  | $2,9 \cdot 10^{-4}$  | $2,9 \cdot 10^{-6}$  | $2,9 \cdot 10^{-8}$  |
|                  |      | Молекулярно-вязкостный    | 8,52                                                                 | $11,0 \cdot 10^{-4}$ | $2,5 \cdot 10^{-6}$  | $2,46 \cdot 10^{-8}$ |

Для переходного режима, охватывающего диапазон чисел от 0,02 до 2, коэффициент диффузии примерно равен сумме коэффициентов для молекулярного и вязкостного режимов.

Приведенные в табл. 3.3 значения коэффициентов диффузии вычисленные для цементного камня различной пористости, свидетельствуют о том, что с увеличением В/Ц и пористости (П) цементного камня коэффициенты диффузии возрастают пропорционально.

опытно увеличению величины для всех размеров капилляров и механизмов переносов.

Таким образом, вакуумирование бетона — сложный процесс, в котором скорость массопереноса газа находится в зависимости от размеров пор, величины разрежения в аппарате, температуры, адсорбционных свойств пористого материала и других факторов [30, 62, 103, 108].

Экспериментальное определение зависимости времени вакуумирования бетонных кубов разной пористости от их размеров проведено Ю. А. Голиковым, А. С. Малошицким и А. Ф. Мироновым [75]. Ниже приводим данные, полученные для односторонней и трехсторонней дегазаций:

| Размер ребра куба, см | Односторонняя |                                                | Трехсторонняя |                                                |
|-----------------------|---------------|------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|
|                       | пористость, % | время достижения вакуума в центре образца, мин | пористость, % | время достижения вакуума в центре образца, мин |
| 10                    | 10,7          | 61                                             | 10,8          | 54                                             |
| 10                    | 12,5          | 12                                             |               |                                                |
| 7                     | 8,5           | 26                                             | 11            | 6                                              |
| 4                     | 6 6           | 22                                             | 12,2          | 3                                              |

Авторами установлено, что и размеры, и пористость образца, значительно влияют на время достижения вакуума в центре образца. Как и следовало ожидать, увеличение пористости образцов, уменьшение их размеров, а также замена односторонней дегазации на трехстороннюю сокращают время вакуумирования. Однако количественные закономерности по результатам эксперимента установить трудно.

В соответствии с рекомендациями НИИЖБ [83] время выдержки (в мин.) бетонных изделий под вакуумом (10—30 мм рт. ст.) перед началом пропитки для практических целей можно подбирать ориентировочно в зависимости от марки бетона и толщины изделия.

| Марка исходного бетона, кг/см <sup>2</sup> | 50 мм | 100 мм | 150 мм |
|--------------------------------------------|-------|--------|--------|
| 200—250                                    | 30    | 30     | 60     |
| 250—350                                    | 30    | 60     | 90     |
| 350—450                                    | 30    | 60     | 120    |
| 450—600                                    | 30    | 90     | 120    |

Вакуум 10—30 мм рт. ст. низкий. Режим течения газа в аппарате при таком давлении вязкостный, поэтому критериями выбора вакуумного насоса будут откачиваемый объем в аппарате и длительность откачки [108]. Для откачки воздуха из камеры объемом  $V$  при постоянной скорости откачки  $S$ , бесконечно большей пропускной способности трубопровода и пренебрежимо малой по сравнению с исходным давлением, до которого может происхо-

дить откачка, продолжительность откачки  $\tau$  определяется по формуле

$$\tau = \frac{V}{S} \ln \frac{p_i}{b}, \quad (3.21)$$

где  $\tau$  — в с или ч;  $V$  — в л ( $\text{м}^3$ );  $S$  — в л/с ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

Из (3.22) следует, что для изменения давления от  $p_i$  до  $p_i/2$  необходимо время

$$\tau_{1/2}^* = n \cdot 0,69 \frac{V}{S}. \quad (3.22)$$

В технологии бетонополимеров можно использовать разнообразные вакуумные насосы, выпускаемые отечественной промышленностью типа ВНК, ВНП, ДВНП, вращательные со скользящими лопатками РВН, ДРВН, вращательные масляные типа ВН или НВГ, а также струйные (эжекторные). Последние при небольших габаритах и простой конструкции высокопроизводительны. Широко распространены водоструйные, пароструйные и пароводяные эжекторы, позволяющие быстро получать вакуум с остаточным давлением до 10 мм рт. ст.

### 3. 5. Пропитка бетонов синтетическими мономерами

Для выяснения влияния структуры бетона на количество поглощенного пропиточного состава, а также свойства бетонополимера нами были исследованы бетонополимеры, изготовленные на основе бетонов с резко отличающимися структурами, которые были получены, в свою очередь, с использованием трех типов формований — виброуплотнения, центрифугирования и пресс-вакуумирования. Образцы после сушки и вакуумирования насыщали смесью мономера (метилметакрилата) с инициатором полимеризации, которую затем проводили под слоем горячей воды.

На расход мономера и прочность получаемого материала бетонополимера влияет не только состав бетона, но и способ его формирования (табл. 3. 4). Снижение В/Ц позволяет, как известно [6, 13, 40, 105], уменьшить общую пористость и увеличить долю мелких пор. В результате пропитки расход пропиточного состава с уменьшением В/Ц снижается; одновременно увеличиваются прочность и коэффициент удельного упрочнения, которые характеризуют прирост прочности на единицу массы мономера, израсходованного на получение 1  $\text{м}^3$  бетонополимера.

Эффективность использования мономера значительно возрастает при получении бетонополимера на основе пресс-вакуумного и центрифугированного бетонов, которые имеют повышенную плотность, мелкопористую структуру и в них отсутствуют воздушные включения. Эти обстоятельства служат причиной меньшего расхода мономера и значительного увеличения коэффициента удельного упрочнения при пропитке центрифугированного и

пресс-вакуумированного бетонов по сравнению с аналогичными показателями у бетона, уплотненного вибрированием.

Состав виброуплотненного бетона, определяющий структуру его порового пространства, влияет и на процесс пропитки. В. А. Сутягин и В. В. Поздеев [75] определили, что с повышением содержания песка в составе заполнителя увеличиваются общая пористость, количество поглощенного мономера, уменьшается время, необходимое для пропитки. Доказано [37, 54], что эффективность использования мономера в бетоне возрастает с уменьшением общей пористости и увеличением прочности, кото-

Таблица 3.4

Влияние способа уплотнения на свойства бетонополимеров

| Способ уплотнения    | В/Ц           |                  | Состав бетона Ц:П:Ш | Поглощенный мономер (М), кг/м³ | Предел прочности при сжатии, МПа |                | Коэффициент удельного упрочнения $R_{6п} - R_6$<br>уд М |
|----------------------|---------------|------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|
|                      | до уплотнения | после уплотнения |                     |                                | до пропитки                      | после пропитки |                                                         |
| Виброформование      | 0,55          | 0,55             | 1:2, 8:3,6          | 128                            | 32                               | 104            | 0,56                                                    |
|                      | 0,40          | 0,40             | 1:1, 5:3,0          | 104                            | 38                               | 120            | 0,68                                                    |
| Пресс-вакуумирование | 0,40          | 0,29             | 1:1, 76:2,03        | 77                             | 51                               | 143            | 1,20                                                    |
| Центрифугирование    | 0,40          | 0,28             | 1:1, 2:2,67         | 67                             | 81                               | 170            | 1,33                                                    |

рые, варьируя в эксперименте, меняли макро- (объемную концентрацию цементного камня) и микроструктуру (структуру цементного камня и контактных зон).

Равномерность структуры бетона влияет на структуру и прочностные свойства бетонополимера. Как было доказано [34], при изменении В/Ц в бетоне от 0,68 до 0,37, количество поглощенного мономера уменьшилось с 7,15 до 3,52%. При этом коэффициент вариации привеса мономера увеличился с 5,71 до 9,97, а коэффициент вариаций прочности полученного бетонополимера соответственно составил 7 и 15%.

Таким образом, выбор оптимальной структуры бетона, который впоследствии будет использован для пропитки, является одним из ключевых моментов в технологии получения бетонополимеров. Общее требование к таким бетонам — создание мелкопоровой структуры сравнительно небольшой общей пористости. Но пористость должна быть по возможности направленной и иметь минимальное содержание замкнутых воздушных включений [37]. Однако эти положения справедливы, если считать критериями оптимизации максимальное значение предела прочности при сжатии бетонополимера и минимальный расход мономера. При изменении требований к бетонополимеру, очевидно, изменяются и требования к структуре бетона, предназначенного для пропитки.

Изучение процесса пропитки бетона с определением продви-

жения фронта пропитанной зоны методически сложно, поэтому большинство исследователей определяют [21, 37, 68, 86] скорость пропитки пористого тела по объему жидкости, поглощенной образцом за определенное время.

М. Р. Никонов [68] исследовал кинетику процесса пропитки бетона водой и метилметакрилатом. Образцы частично или полностью погружали в открытый сосуд с жидкостью и измеряли массу. Установлено, что процесс насыщения бетона метилметакрилатом удовлетворительно описывается выражением

$$W_t = W_{\max} [1 - (1 + \sqrt{\gamma t})^{-1}], \quad (3.23)$$

где  $W_t$  — изменение массы образца в единицу времени  $t$ , г/с;  $W_{\max}$  — максимальный привес образца, г/см<sup>2</sup>;  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, связывающий пористость образца с его проницаемостью.

Найденные экспериментально для трех значений В/Ц (0,3; 0,4 и 0,5) величины  $\gamma$  составляют 1,1; 1,2 и 1,3, а  $W_{\max}$  — соответственно 2,53; 3,04 и 3,91. М. Р. Никонов [68] определил прямолинейную зависимость между проницаемостью ( $1/W$ ) и скоростью насыщения образца ( $dW/dt$ ) при пропитке бетона метилметакрилатом (рис. 3.6). К сожалению, из-за большого количества заземленного воздуха  $W_{\max}$ , определенное в работе [70], было далеко от максимальных значений насыщения бетонных образцов мономером. Обычно для В/Ц 0,3—0,5 оно составляет 4—10% по массе [34, 75, 76, 118]. Зависимости, выявленные для скорости насыщения тех же бетонов водой, носят экспоненциальный характер, отличающийся меньшими скоростями в начальный период времени, чем в (3.23), предложенный для насыщения метилметакрилатом.

О влиянии режимов пропитки на кинетику поглощения бетоном мономеров сообщено в работе [21]. Были опробованы четыре режима: А — погружение образцов в открытую емкость с мономером; Б — предварительное вакуумирование образцов при 10 мм рт. ст. и последующая пропитка при атмосферном давлении; В — пропитка предварительно вакуумированных образцов при избыточном давлении 0,2 МПа; Г — пропитка предварительно вакуумированных образцов при давлении 0,3 МПа.

Во всех случаях за  $W_{\max}$  принимали количество мономера, поглощенное за 48 ч непрерывной пропитки. На рис. 3.7 показана схема установки, в которой проводились испытания по пропитке бетонных кубов 7×7×7 см, имеющих состав Ц:П:Ш=1:2,78:3,6 и В/Ц=0,55 (портландцемент — марка 500, песок —  $M_{кр}=2,2$  гранитный щебень — фракция 5—10 мм).

Выяснено, что предварительное вакуумирование (режим Б) резко увеличивает (на 50—70%) количество поглощенного мономера по сравнению с пропиткой, произведенной открытым погружением. Применение избыточного давления повышает эту величину до 90—100%. В течение одного часа поглощается 70—80%

мономера от величины пористости для каждого режима пропитки. Со временем скорость пропитки убывает и через 30—60 мин. она близка к своему минимальному значению, хотя поглощение мономера продолжается. Аналогичные результаты получены и другими исследователями [36, 54, 75, 76, 107, 108].

Одна из сложных проблем, возникающих при организации промышленного выпуска изделий и конструкций из бетонополимера, — необходимость непрерывного контроля процесса пропитки непосредственно на изделии. Перспективными могут быть акустический и диэлектрический методы контроля процесса пропитки. Акустический метод, описанный В. В. Кагнером и А. Б. Марцинчиком [75], основан на регистрации электронной аппаратурой звуковых сигналов, сопровождающихся специальным датчиком.

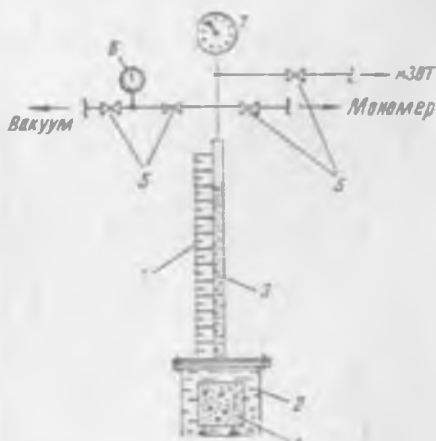


Рис. 3.7. Схема установки для исследования кинетики пропитки бетона:

1—образец; 2—сосуд с проточной жидкостью; 3—трубка; 4—шкала; 5—вентили; 6—вакуумметр; 7—манометр.

Число улавливаемых импульсов пропорционально привесу поглощенного мономера. Автоматический контроль процесса пропитки диэлектрическим методом основан на использовании в качестве информативного параметра различия диэлектрических проницаемостей бетона и мономера. А. А. Старков, Г. К. Михайлов и др. [76] предложили формулу для расчета диэлектрической проницаемости бетонополимера  $\epsilon$  по известным значениям диэлектрической проницаемости мономера  $\epsilon_1$  и бетона  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon = \epsilon_2 \left( 1 + 3v \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{(\epsilon_1 + 1,25\epsilon_2)} \right), \quad (3.24)$$

где  $v$  — объемное содержание мономера в бетоне.

Выше были сформулированы требования к пропиточным материалам, которые сводились к снижению их вязкости  $\eta$  и краевого угла смачивания  $\theta$ , а также увеличению поверхностного натяжения  $\sigma$ . В работе [111] даны сведения о большом количестве использованных мономеров и олигомеров для пропитки бетона. Наиболее высокие скорости пропитки получены на мономерах типа метилметакрилат и стирол. Более подробные сведения о влиянии физико-химических параметров мономеров на кинетику пропитки даны в работе [112]. В качестве модельной пористой среды был выбран асбестоцемент, пористость которого варьировали из-

менением состава. Для пропитки использовали мономеры и другие жидкости, свойства которых приведены в табл. 3.5.

По результатам исследований [112] были сделаны выводы о возможности формального приложения законов Фика для снижения кинетики поглощения до степени пропитки, составляющей 80% максимальной, смально возможной, включены коэффициенты диффузии пропиточных жидкостей в асбестоцементы разного состава. Показано, что

Таблица 3.5

Свойства низкомолекулярных пропиточных жидкостей

| Пропиточная жидкость           | $\eta$ , пуаз | $\frac{\sigma}{\text{дин см}}$ | $\cos \theta$ | Температура кипения, °С | Предел прочности полимера при сжатии, кг/см <sup>2</sup> |
|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|
| Вода дистиллированная          | 0,75          | 72,4                           | 0,26          | 100                     | —                                                        |
| Толуол                         | 0,54          | 26,8                           | 0,36          | 110                     | —                                                        |
| Стирол                         | 0,63          | 29,0                           | 0,79          | 93                      | 350                                                      |
| Винилпропионат                 | 0,43          | 24,0                           | 0,55          | —                       | —                                                        |
| Метилметакрилат                | 0,51          | 26,6                           | 0,50          | 100,1                   | 1020                                                     |
| Винилацетат                    | 0,39          | 22,9                           | 0,31          | 28                      | —                                                        |
| Бутилацетат                    | 0,79          | 26,1                           | 0,31          | —                       | —                                                        |
| Метилацетат                    | 0,44          | 23,9                           | 0,37          | —                       | —                                                        |
| Диаллилфталат                  | —             | —                              | —             | 177                     | 1530                                                     |
| Ненасыщенная полиэфирная смола | 1000          | —                              | —             | —                       | 1600                                                     |

закон Пуазейля применим лишь для 50%-ной пропитки. Результат суммирован следующим выражением:

$$D = \frac{D^* \sigma \cos \theta r^2}{\eta} \quad (3.25)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;  $\eta$  — вязкость, сПг;  $\sigma$  — поверхность натяжения, дин/см;  $\cos \theta$  — угол смачивания;  $r$  — средний радиус, см;  $\epsilon$  — пористость;  $D^*$  — кажущаяся постоянная, равная  $2,0 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>.

Таким образом, коэффициент диффузии пропиточной жидкости пропорционален поверхностному натяжению, углу смачивания, квадрату среднего радиуса пор и обратно пропорционален пористости и вязкости жидкости.

Анализ исследования, проведенный И. Касимовым, показывает, что для пропитки бетона не рекомендуется использовать вязкие жидкости. При поверхностной обработке массивных конструкций или тонкостенных изделий можно применять различные олигомеры или растворы полимеров.

При организации промышленного производства бетонополимеров процесс пропитки конструкций и изделий осуществляют в герметичном пропиточном оборудовании, рассчитанном и подобранном в соответствии с требованиями технологического режима и

конфигурацией изделий и конструкций. Как правило, в пропиточном оборудовании должна быть предусмотрена возможность полимеризации, для чего обычно необходим обогрев пропиточной камеры. Продолжительность пропитки каждого бетонного изделия определяется экспериментально, так как значительно зависит от состава бетона, толщины изделия, используемого пропиточного состава, а также режима проведения процесса пропитки.

В табл. 3.6 приведены рекомендуемая НИИЖБ продолжительность пропитки по двум режимам в зависимости от марки исходного бетона и толщины изделия. Режимы I предусматривает ва-

Таблица 3.6

**Продолжительность пропитки бетонных изделий  
в зависимости от марки бетона и толщины изделий**

| Марка исходного бетона | Режим I  |           |           | Режим II |           |           |
|------------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
|                        | до 50 мм | до 100 мм | до 150 мм | до 50 мм | до 100 мм | до 150 мм |
| 200—250                | 1,5      | 6         | 16        | 1        | 4         | 12        |
| 250—350                | 2        | 7         | 18        | 1,5      | 5         | 13        |
| 350—450                | 4        | 9         | 22        | 2        | 7         | 17        |
| 450—600                | 4        | 10        | 26        | 2        | 8         | 20        |

куумирование изделий при остаточном вакууме 10—30 мм рт. ст., II — пропитку отвакуумированных изделий под давлением 2 кг/см<sup>2</sup>, которое создается сжатым азотом.

### 3. 6. Полимеризация мономеров в поровом пространстве бетонов

Завершающая стадия в технологии получения бетонополимеров — полимеризация пропиточного состава в поровом пространстве бетона, которую можно провести, используя следующие способы инициирования реакции:  $\gamma$ -радиационное облучение, термическое воздействие и термokatалитическое инициирование.

Радиационный способ полимеризации мономеров основан на способности двойных связей виниловых, аллиловых и других ненасыщенных соединений раскрываться под действием энергии облучения. Возникающие при этом радикалы вызывают реакцию полимеризации. Радиационную полимеризацию обычно осуществляют, используя в качестве источника  $\gamma$ -излучения изотоп <sup>60</sup>Co [52, 75, 111, 118]. Однако несмотря на получаемые высокие физико-механические показатели бетонополимеров работа с мощными источниками  $\gamma$ -облучения осложняется необходимостью иметь специальную защиту персонала от облучения. Кроме того, стоимость самой  $\gamma$ -радиационной обработки достаточно высока, что служит причиной ограниченного использования ее в промышленных масштабах.





ся вблизи ее, резко ограничивается, что может вызвать как ускорение, так и замедление процесса полимеризации [42]. В граничных слоях реакция часто протекает с большими скоростями, чем реакция в объеме, хотя это и не улучшает свойства наполненного полимера. На глубину прохождения реакции полимеризации и структуру наполненного полимера значительно могут влиять состав минеральной фазы и ее дисперсность. Так, в работе [45] сообщается, что введение аэросила и каолина уплотняет, а введение талька разрыхляет структуру отвердевшей смеси ненасыщенного полиэфира со стиролом.

Ю. С. Липатов [42] обращает внимание на то обстоятельство, что взаимодействие минеральной фазы и полимера не прекращается на стадии полимеризации, а продолжается в последующий период, что выражается в процессе релаксации. Таким образом, можно предположить, что реакция полимеризации мономеров, находящихся в порах бетона и непосредственно контактирующих с минеральными составляющими, будет, как и в случае наполненных композиций, отличаться от полимеризации в блоке.

Согласно [15, 112, 115], кинетика полимеризации мономеров в поровом пространстве значительно зависит от способности двойной связи винилового мономера освобождаться или притягивать электрон. При полимеризации стирола, обогащенного электронами, можно ожидать их перемещения к минералу. Возникшие при этом катионы способны ускорить или даже ингибировать реакцию полимеризации. Для метилметакрилата, чья двойная связь обеднена электронами, наблюдается ингибирование реакции, так как минерал оттягивает на себя электроны растущей цепи (радикала). Наличие поровой структуры, как показали колориметрические и гель-хроматографические измерения кинетики полимеризации стирола в порах асбоцемента, влияет как на процесс инициирования, так и на полимеризацию. Поровая среда асбоцемента положительно влияет на полимеризацию стирола, иницированную перекисью бензонла. Что касается молекулярной массы (М.м.), то, по данным гель-хроматографических измерений экстрактов из пропитанного полиметакрилатом бетона, среднечисловая и средневесовая М. м. имеют тенденцию к уменьшению с увеличением температуры полимеризации, а средневесовая М. м. уменьшается, кроме того, и при увеличении глубины пропитки.

Весьма важно при полимеризации исключить испарение мономера с поверхности бетона. Момеры стирол и метилметакрилат весьма летучи, поэтому до начала полимеризации с открытых поверхностей пропитанных изделий испаряется значительное количество мономера, что служит причиной непроизводительных потерь дефицитного материала, загрязняет воздушное пространство рабочих помещений и ухудшает свойства бетонополимерного изделия. Для предотвращения испарения мономера пропитанные бетонные изделия при полимеризации герметизируют, оборачивая их фольгой, пленкой или погружая в воду, глицерин, нитролатум

и другие жидкости [75, 76, 111, 112, 115]. В промышленности используется метод погружения пропитанных изделий в жидкость.

Оборудование для проведения термокatalитической полимеризации должно быть герметичным. Как правило, процесс проводят в тех же камерах, что и пропитку. При этом по окончании пропитки пропиточный состав сливают в резервную емкость, а камеру заполняют герметизирующей жидкостью, которая должна предотвращать испарение мономера и обеспечивать нагрев пропитанных изделий. Замена пропиточной жидкости на герметизирующую не должна длиться более 1—3 мин., чтобы исключить испарение мономера. Продолжительность полимеризации различных мономеров зависит от температуры, типа и концентрации инициатора.

Наиболее распространены пропиточные составы на основе метилметакрилата и стирола, инициированные перекисными соединениями. Время полимеризации их при температуре 60—80°C от 3 до 8 ч.

#### **Глава 4. РАЗРАБОТКА БЕТОНОПОЛИМЕРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАЙОНАХ С СУХИМ ЖАРКИМ КЛИМАТОМ**

##### **4. 1. Аппаратура для пропитки бетонных образцов полимеризующимися составами**

Для изготовления опытных бетонополимерных образцов и отработки параметров пропитки использовалась установка, состоящая из автоклава, вакуум-насоса для создания разрежения в автоклаве, устройство для дозирования и автоматической подачи пропиточного состава в автоклав, устройства для создания избыточного давления, камеры для полимеризации, подъемного оборудования для загрузки и выгрузки контейнеров с образцами (рис. 4. 1).

Общая схема изготовления бетонополимеров была разработана в соответствии с технологией бетонополимерных материалов (см. гл. 3).

Сушка образцов и изделий осуществлялась в лабораторном сушильном шкафу марки КЛТ-12 конвективным методом при температуре 130—150°C до постоянной массы изделий (образцов).

Автоклав для пропитки имел цилиндрическую форму с вертикально-открывающейся крышкой. Внутренний диаметр 650 мм и высота 850 мм позволили использовать автоклав даже для пропитки крупноразмерных образцов. При помощи вакуум-насоса в автоклаве можно было создавать разрежение до 0,015 МПа. Для пропитки под давлением до 0,3—0,4 МПа применяли газообразный азот. Полимеризация пропиточного состава в поровом пространстве бетонных образцов осуществлялась по термокatalитическому механизму в камере с водой, нагретой до 80—85°C. Регулирование температуры воды в камере автоматическое. Остаточный

ся после пропитки состав перекачивался обратно в расходную емкость, оборудованную холодильником, что допускало его многократное использование.

Для исследования кинетики пропитки бетона мономерами и отработки технологических параметров применяли специальную установку, схема которой представлена на рис. 4.1. Установка позволила изучать кинетику пропитки на образцах-кубах с реб-



Рис. 4.1. Общий вид установки для пропитки бетонных образцов полимеризующимися составами.

ром до 70 мм с применением предварительного вакуумирования и избыточного давления.

Скорость поглощения пропиточного состава определяли по опусканию столба мономера в стеклянной калиброванной трубке в единицу времени. Стеклянная трубка защищена металлическим кожухом, а смотровая часть закрыта полиэтиленовой пленкой.

По результатам насыщения строили кинетическую кривую поглощения бетонным образцом пропиточного состава. Окончательный привес полимера в образце определяли контрольным взвешиванием.

#### 4. 2. Характеристика исходных материалов, примененных в исследовании

Для проведения экспериментальных работ использовали материалы, которые испытывались согласно ГОСТам, технических условий и требований.

Цемент. В качестве цементного вяжущего использован портландцемент марки 500 Белгородского завода (табл. 4.1). Нормальная густота теста 23%, начало схватывания через 1 ч. 27 мин., конец — через 3 ч 24 мин. Пределы прочности при сжатии и растяжении, при изгибе после 28 суток хранения соответственно 49,0 и 7,5 МПа. Химический состав (в %) клинкера:  $\text{SiO}_2$ —22,58;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —4,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —4,4;  $\text{CaO}$ —66—0,1;  $\text{MgO}$ —0,6;  $\text{SO}_3$ —0,66, П. п. п. —1,20, минералогический (в %):  $\text{C}_3\text{S}$ —66;  $\text{C}_2\text{S}$ —20;  $\text{C}_3\text{A}$ —4;  $\text{C}_4\text{AF}$ —13. Физическая характеристика: коэффициент насыщения—0,9; силикатный модуль—2,53; глиноземный модуль—1,02; свободный  $\text{CaO}$ —0,34%.

Таблица 4.1

Составы бетонов, примененных в исследованиях

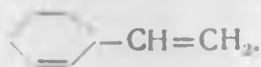
| Серия образцов | Соотношение компонентов |      | Расход составных частей на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг |       |        |      |
|----------------|-------------------------|------|--------------------------------------------------------|-------|--------|------|
|                | Ц:П:Щ                   | В/Ц  | цемент                                                 | песок | щебень | вода |
| A-1            | 1:2, 78:3,6             | 0,55 | 300                                                    | 835   | 1080   | 165  |
| A-2            | 1:1, 21:2,3             | 0,35 | 470                                                    | 570   | 1080   | 165  |
| A-3            | 1:3, 81:4,5             | 0,64 | 240                                                    | 915   | 1080   | 165  |
| P-1            | 1:3                     | 0,40 | 400                                                    | 1200  | —      | 160  |
| P-2            | 1:2                     | 0,40 | 480                                                    | 960   | —      | 192  |

Испытания портландцемента проводили согласно ГОСТу 310-66 и 10178-62.

Щебень гранитный. Объемная масса—1460 кг/м<sup>3</sup>, содержание илстых и глинистых частиц около—1%, дробленых зерен—около 88%, удельная поверхность—5,4 см<sup>2</sup>/г, общее водопоглощение 1,21%, водопоглощение поверхности—0,81%, водопоглощение пор—0,4%; пористость—0,83%; фракция щебня—5—10 мм.

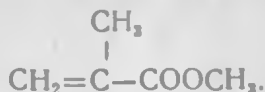
Песок—строительный рядовой Тучковского карьера, объемная масса—1550 кг/м<sup>3</sup>, содержание илстых и глинистых частиц—около 0,81%, модуль крупности  $M_{кр}$ —2,1—2,2. В качестве пропиточных материалов использовали стирол, метилметакрилат и их сополимеры.

Стирол (ГОСТ 10003-62)—бесцветная или слабожелтого цвета нерастворимая в воде жидкость. Структурная формула:



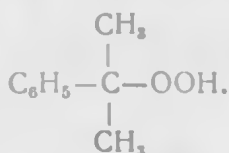
Основные характеристики стирола: молекулярный вес—104,14, температура кипения при 760 мм/рт. ст.—145,2°C, плотность при 20°C—0,90600 г/мл, вязкость при 20°C—0,78 сП, поверхностное натяжение при 20°C—32,2 дин/см; содержание основного вещества—99,50%; показатель преломления при 20°C—1,5469; полимер отсутствует; количество перекисных соединений—0,002%, альдегидов—0,014, присутствие стабилизатора гидрохинона—0,01%.

Метилметакрилат (ГОСТ 5713-70) — прозрачная бесцветная жидкость имеет структурную формулу



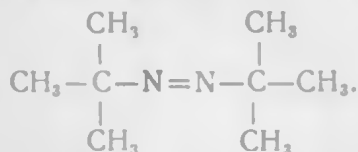
Технический метилметакрилат имеет следующие свойства (в %): содержание основного вещества не менее 99,8, воды — не более 0,05, метилметакриловой кислоты — не более 0,004; примесей (ацетата, метанола, метилокрилата) — не более 0,15; гибитора-дифенилол-пропана—0,0003—0,0005 или гидрохинола—0,05—0,07, полимер отсутствует.

В качестве инициаторов твердения использовались гипериз и порофор. Гидроперекись изопропил бензола (гипериз) — МРТУ-38-5-66— имеет структурную формулу



Гипериз — светло-желтая низковязкая маслянистая жидкость с содержанием активного кислорода 9,3%. Применяется в виде 70% раствора в дибутилфталате. Хорошо растворяется в органических растворителях и сравнительно плохо в воде. Удельный вес больше 1.

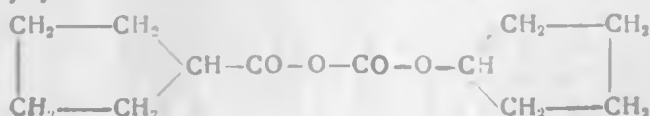
Порофор (динитрил азодиизомаляной кислоты) — МРТУ 6-09-5749-68) — имеет структурную формулу



Это белый кристаллический порошок, плавящийся при 98°C, растворимый в спирте, эфире и ацетоне. Нерастворим в воде. Огнен и взрывоопасен. При температуре выше 112°C разлагается с обильным газовыделением.

Повышение эффективности инициатора полимеризации достигается введением в состав ускорителя полимеризации — нафтената кобальта.

Нафтенат кобальта (МРТУ 6-05-1075-67) — кобальтовая соль цикlopентадиенкарбоновой кислоты — имеет структурную формулу



Нафтенат кобальта — продукт сине-фиолетового цвета. Применяется в виде 10%-ного раствора в стироле.

Для получения полимеров в трехмерной структурной формуле использовался сшивающий агент — дивинилбензол (МРТУ 6-05-947-65). Это бесцветная жидкость с приятным запахом, растворимая в большинстве органических растворителях; в воде нерастворим. Структурная формула дивинилбензола:



При выборе режима твердения отформованных бетонных образцов главным условием было получение бетона с наиболее высокими физико-механическими показателями.

Таблица 4.2

Влияние режима твердения бетона на расход мономера при пропитке и прочность бетонополимера

| Серия бетона | Режим твердения | Расход мономера, кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности при сжатии, МПа |                         | $\frac{R_{6п}}{R_6}$ |
|--------------|-----------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------|
|              |                 |                                    | исходный бетон, $R_6$            | бетонополимер, $R_{6п}$ |                      |
| А-3          | Нормальное      | 129                                | 26                               | 120                     | 4,62                 |
|              | Пропаривание    | 140                                | 24                               | 115                     | 4,79                 |
|              | Нормальное      | 123                                | 34                               | 127                     | 3,74                 |
| А-1          | Пропаривание    | 134                                | 32                               | 121                     | 2,59                 |
|              | Нормальное      | 124                                | 51                               | 140                     | 2,59                 |
| А-2          | Пропаривание    | 125                                | 52                               | 136                     | 2,62                 |
|              | Нормальное      | 154                                | 60                               | 150                     | 2,65                 |
| А-4          | Пропаривание    | 156                                | 58                               | 158                     | 2,72                 |
|              | Нормальное      | 206                                | 26                               | 115                     | 4,62                 |
| Р-2          | Пропаривание    | 212                                | 23                               | 112                     | 4,87                 |

Для исследований были выбраны два режима твердения бетона:

- 1) естественное во влажной среде в течение 28 суток;
- 2) тепловлажностная обработка применительно к заводской технологии производства бетонных и железобетонных конструкций по схеме: предварительное выдерживание при температуре 20°C—2 ч; подъем температуры до 80°C—3 ч; изотермический прогрев при 80°C—6 ч; остывание до температуры 40°C—3 ч.

Таким образом, весь цикл составляет 14 ч. Этот режим принят с учетом того, что в условиях сухого жаркого климата он является довольно мягким и не окажет большого деструктивного воздействия на бетон.

Для определения влияния режима твердения бетона на свойства бетонополимера проведены опыты по пропитке кубов размерами 7×7×7 см серии А-1; А-2; А-3; Р-1 и Р-2. Образцы естест-

венного твердения пропитывали после 20-суточного хранения в нормальных условиях, а термообработанные образцы модифицировались в возрасте 7 суток.

Из результатов исследований, представленных в табл. 4.2, видно, что режимы твердения бетона незначительно влияют на прочностные показатели полученных бетонополимеров. Учитывая преимущественную ориентацию на заводскую технологию изготовления бетонополимеров, на наш взгляд, целесообразно использовать пропаренные бетоны, тем более, что расход мономера при пропитке таких бетонов практически равен расходу мономера при пропитке бетонов нормального твердения.

#### 4.3. Разработка полимеризующихся составов для получения высокопрочных и термостабильных бетонополимеров

В настоящее время в качестве мономеров, применяемых для пропитки бетона, наибольший интерес представляют стирол и метилметакрилат. Обладая малой вязкостью, большой проникающей способностью, высокой прочностью в отвержденном состоянии, они полимеризуются в поровой структуре цементного бетона практически доступными методами без выделения побочных продуктов-газов или воды.

В НИИЖБ Госстроя СССР в течение нескольких лет проводились исследования по пропитке бетона стиролом и метилметакрилатом [36, 71, 83].

Установлено [9, 21, 36], что для получения высокопрочных бетонополимеров в качестве иницирующей системы рекомендуется использовать гипериз и 10%-ный раствор в стироле нафтената кобальта, взятых соответственно в количестве 4—5 и 8—10% массы мономера. Стирол дает наилучшие результаты в случае применения при его полимеризации порофора в количестве 1—2% всей массы.

Из отечественных и зарубежных источников [85—88] известно, что при использовании стирола для пропитки бетона прочность и деформативность получаемых бетонополимеров несколько хуже, чем при применении метилметакрилата. Однако стоимость стирола более чем в два раза ниже, что при оценке экономической эффективности использования бетонополимеров в строительстве играет далеко немаловажную роль.

Для выявления оптимального пропиточного состава на основе стирола и метилметакрилата были проведены работы по пропитке бетонов как непосредственно этими мономерами, так и их смесями в различных соотношениях. В последнем случае после полимеризации в теле бетона образуются сополимеры.

Пропитке подвергались образцы-кубы с ребром 7,07 см из бетона серии А-1. Иницирование полимеризации пропиточных составов в порах бетона осуществлялось гиперизом с ускорителем нафтенатом кобальта в количестве соответственно 5 и 10% всей



массы. Отверждение велось в нагретой до 80—85°C воде в течение 7 ч.

Свойства получаемых бетонополимеров оценивались по показателям прочности кубов при сжатии (рис. 4.2). Наилучшие абсолютные показатели упрочнения бетонополимеров получены при пропитке метилметакрилатом. Однако при использовании сополимеров на основе стирола и метилметакрилата также можно получать высокопрочные бетонополимеры. Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что при уменьшении коли-

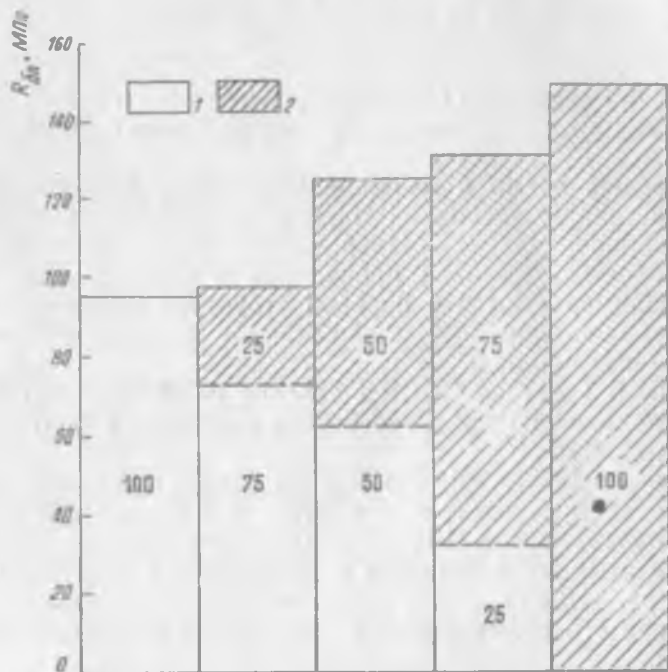


Рис. 4.2. Зависимость прочности бетонополимеров от соотношения содержания стирола (1) и метилметакрилата (2) в пропиточном составе

чества стирола в пропиточном составе прочность бетонополимера повышается. В то же время использование для пропитки состава на основе стирола и метилметакрилата, взятых в равных частях по массе, позволяет получать бетонополимеры с прочностью на сжатие 120—130 МПа. Это в ряде случаев отвечает требованиям, предъявляемым к материалу при значительной экономии наиболее дорогостоящего и дефицитного мономера — метилметакрилата.

Один из недостатков термопластичных полимеров (полистирола, полиметилметакрилата) — их недостаточная термическая стойкость. В связи с этим не всегда можно их использовать для получения бетонополимерных изделий и конструкций, работающих при высоких, более 100°C, температурах. Так, температура размягчения

полиметилметакрилата равна 80—90°C, а деполимеризация при термическом разложении начинается при температуре 140—150°C [86, 88]. Хотя эти показатели у полистирола несколько выше (90 и 160°C), он также не соответствует требованиям термостойкости.

В условиях сухого жаркого климата среднеазиатских республик бетонополимерные конструкции в летнее время года могут нагреваться на солнце до температуры 75—80°C и более, что снижает прочность материала.

Процессы термической деструкции можно ослабить или совсем исключить за счет введения в мономер добавок, стимулирующих возникновение поперечных связей [19, 20].

В работе [48, 111] для пропитки бетона, предназначенного для эксплуатации при повышенных температурах, используется смесь мономеров, состоящих из 60% стирола и 40% триметилпропантриметилакрилата. Имеются сведения о применении для пропитки смеси, состоящей из 90% диаллилфталата и 10% метилметакрилата [111].

Важные свойства сшитых полимеров — термостабильность и высокие термомеханические свойства. Температура размягчения их превышает температуру начала деструкции. Для повышения термической устойчивости бетонополимеров были проведены исследования сополимеризации стирола с дивинилбензолом, который служит сшивающим агентом при полимеризации.

Для опытов были взяты образцы-кубы с ребром 30 см из мелкозернистого бетона серии Р-2. Пропитка производилась в лабораторной пропиточной установке с применением вакуума и избыточного давления.

Учитывая, что качество бетонополимеров на основе смеси стирола и дивинилбензола зависит от целого ряда факторов — количества дивинилбензола в смеси, температуры сополимеризации, количества инициатора (порофора), времени сополимеризации — для сокращения объема работ нами было выполнено центральное ортогональное композиционное планирование эксперимента:

| Характеристика        | $z_1$ , ч. м. | $z_2$ , ч. м. | $z_3$ , ч. м. | $z_4$ , ч. м. |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Основной уровень      | 12,5          | 1,25          | 70            | 6             |
| Интервал варьирования | 5 3           | 0,53          | 10 6          | 2 83          |
| Верхний уровень       | 20            | 2,0           | 85            | 10            |
| Нижний уровень        | 5             | 0,5           | 55            | 2             |

На основании результатов сополимеризации в блоке и технико-экономических соображений выбрана оптимальная область измерения параметров: количество дивинилбензола от 5 до 20 частей массы (ч. м.), порофора ЧХЗ-57 — от 0,5 до 2,0, температура сополимеризации 55—85°C, время сополимеризации от 2 до 10 ч.

В качестве параметра оптимизации (функции отклика) был выбран предел прочности бетонополимеров при сжатии ( $y$ ), а в качестве факторов, влияющих на прочность, вышеуказанные параметры, т. е.  $z_1$  — концентрация дивинилбензола (ДВБ);  $z_2$  — кон-

центрация порофора (ПФ);  $z_3$  — температура сополимеризации,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $z_4$  — время сополимеризации.

Задача применения метода планирования заключалась в определении оптимальных параметров, при которых прочность на сжатие имеет максимальные значения. Решение подобной задачи с числом факторов планирования равным 4 приведено в [48], где дана и матрица планирования.

Число опытов в матрице планирования определяем по формуле

$$N = 2^n + 2n + 1, \quad (4.1)$$

где  $2^n$  — количество опытов, образующих полный факторный эксперимент;  $2n$  — число «звездных» точек в факторном пространстве; 1 — опыт в центре планирования;  $n$  — число факторов.

Для четырех факторов  $N=25$ .

После вычисления коэффициентов и отсева незначимых величин получаем уравнение регрессии в безразмерном виде

$$\bar{y} = 719 + 50,17 X_2 + 111,2 X_3 + 84,86 X_4 + 78,25 X_1 X_4 - 76,0 X_3 X_4, \quad (4.2)$$

Уравнение было проверено на адекватность по критерию Фишера.

В результате анализа и решения уравнения регрессии методом подстановки были получены оптимальные условия, соответствующие максимальному значению  $y$ :

$$y_{\max} = 107,2 \text{ МПа}$$

при  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 1,414$ .

Как видно, максимальное значение  $y$  соответствовало максимальным значениям параметров: концентрация ДВБ ( $z_1$ ) — 20 ч. м., концентрация ПФ ( $z_2$ ) — 2,0 ч. м., — температура сополимеризации ( $z_3$ ) —  $85^{\circ}\text{C}$ ; время сополимеризации ( $z_4$ ) — 10 ч.

На основании теоретически полученных оптимальных условий были поставлены контрольные опыты. Экспериментальная величина  $y$  составила 104,0 МПа, что вполне соответствует рассчитанной величине.

Для определения полноты прохождения реакции сополимеризации и степени «сшивки» бетонополимерные образцы экстрагировались хлороформом. Выявлено, что экстрагировалось лишь 2—3% полимера, т. е. «сшивка» прошла на 97—98% при общем содержании сополимера в бетоне около 7—8% всей массы.

Полученные опытные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшие показатели упрочнения наблюдаются у бетонополимеров на основе полиметилметакрилата;

2. Использование для пропитки бетонов сополимеров стирола и метилметакрилата в равном соотношении по массе позволяет получать бетонополимеры с прочностью на сжатие 120—125 МПа при значительной экономии дефицитного метилметакрилата;

3. Применение для пропитки сшитых сополимеров на основе стирола и дивинилбензола повышает прочность бетонополимера на 10—12% с образованием в поровом пространстве бетона полимеров с трехмерной структурой.

#### 4.4. Исследование режимов пропитки бетона и их влияние на прочностные показатели бетонополимера

В данной работе на бетонах серии А-1, А-2, А-3 изучалось влияние предварительного вакуумирования бетонных образцов на степень их насыщения мономером при атмосферном и повышенном давлении и свойства получаемого бетонополимера.

Экспериментальные исследования проводились при четырех режимах пропитки бетонов:

А — открытое погружение образцов в пропиточный состав;

Б — предварительное вакуумирование бетонных образцов при 0,0015 МПа и пропитка при атмосферном давлении;

В — предварительное вакуумирование и пропитка бетонных образцов при избыточном давлении 0,1 МПа;

Г — предварительное вакуумирование и пропитка бетонных образцов при избыточном давлении 0,2 МПа.

Во всех перечисленных режимах время пропитки бетона 48 ч.

Статистическая обработка экспериментальных данных по пропитке бетонов мономером (метилметакрилатом) позволила выявить зависимость между величиной поглощенного при пропитке мономера от продолжительности пропитки, которую можно описать уравнением вида [68]:

$$W_{\tau} = W_{\max} [1 - (1 + k\tau^{-0.5})^{-\gamma}], \quad (4.3)$$

где  $W_{\tau}$  — содержание мономера в единице объема бетона в момент времени, кг/м<sup>3</sup>;  $k=1$  — коэффициент пропорциональности;  $W_{\max}$  — максимальное поглощение мономера при пропитке, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  — эмпирический коэффициент.

Ниже приводим значения  $W_{\max}$ ,  $\gamma$  и коэффициента корреляции, полученные при статистической обработке данных по пропитке в зависимости от режимов пропитки:

| Режим пропитки | Серия бетона | $\gamma$ | $W_{\max}$ | Коэффициент корреляции статистической обработки данных |
|----------------|--------------|----------|------------|--------------------------------------------------------|
| А              | А-1          | 0,68     | 70         | 0,911                                                  |
|                | А-2          | 0,51     | 64         | 0,924                                                  |
| Б              | А-1          | 0,78     | 110        | 0,965                                                  |
|                | А-2          | 0,59     | 105        | 0,921                                                  |
| В              | А-1          | 0,8      | 125        | 0,899                                                  |
|                | А-2          | 0,63     | 18         | 0,912                                                  |
| Г              | А-1          | 0,82     | 134        | 0,996                                                  |
|                | А-2          | 0,66     | 125        | 0,903                                                  |

На рис. 4.3 показаны кривые поглощения мономера при пропитке бетонных образцов серий А-1 и А-2, построенные на основе степенных уравнений (4.3).

Как и следовало ожидать, предварительное вакуумирование (режим Б) резко (на 50—70%) увеличивает количество поглощенного мономера бетонными образцами по сравнению с пропиткой по режиму А. Применение избыточного давления повышает эту величину до 90—100%.

Анализ кривых (рис. 4.3) показывает, что при всех режимах пропитки в течение первого часа поглощается около 70—80% мо-

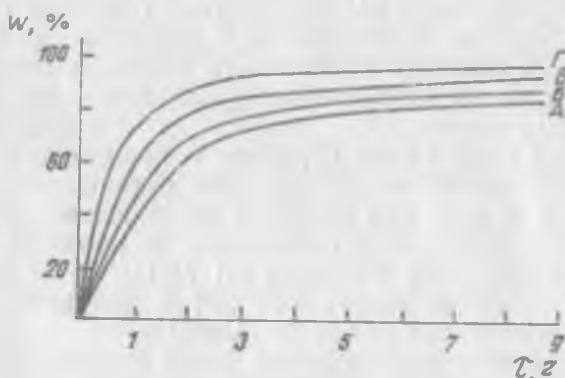


Рис. 4.3. Зависимость от времени степени насыщения образцов по режимам А, Б, В и Г.

номера от максимально возможной величины  $W_{\max}$ . Через три часа после начала пропитки величина  $W$  составляет уже 90—95% от  $W_{\max}$ . Причем этот процесс развивается тем интенсивнее, чем больше величина избыточного давления при пропитке бетона мономером.

Аналитическое дифференцирование уравнения (4.3) позволяет получить уравнение скорости пропитки бетона мономером  $dW/d\tau$  в зависимости от времени:

$$\frac{dW}{d\tau} = - \frac{0.5 W_{\max} k \tau}{\sqrt{\tau}} (1 + \sqrt{\tau}).$$

Знак минус в правой части уравнения (4.4) указывает на уменьшение скорости пропитки  $dW/d\tau$  во времени, причем наиболее интенсивно для менее плотного бетона. Это объясняется более пористой структурой бетонных образцов серии А-1 и повышением В/Ц отношения. При увеличении продолжительности пропитки значения ее скорости для бетонов обеих серий практически одинаковы, что свидетельствует о дополнении наиболее тонких пор и капилляров, объем и размеры которых у бетонов серий А-1 и А-2 практически одинаковы.

Влияние режимов пропитки на прочностные показатели бетонополимера хорошо видно из данных табл. 4.3. Как видно, вакуумиро-

вание и избыточное давление при пропитке резко повышают прочность бетонополимеров по сравнению с бетонами, пропитанными по режиму А. Причем для бетонополимера, полученного на основе более плотного бетона серии А-2 с использованием предварительного вакуумирования и избыточного давления при пропитке, прирост прочности значительно выше. В то же время, для достижения в практических целях предела прочности бетонополимера, при сжатии порядка 100—120 МПа, достаточно использовать при пропитке бетонов марок 200—500 только предварительное вакуумирование, не применяя повышенное давление.

Известно [28, 111], что пропиточные составы на основе виниловых мономеров (метилметакрилата, стирола) являются легко

Таблица 4.3

Влияние режима пропитки на прочностные показатели бетонополимера

| Серия бетона | В/Ц  | Режим пропитки | Расход мономера при пропитке $W_{\text{мах}}$ , кг/м <sup>3</sup> | Содержание полимера в бетонополимере $M$ , кг/м <sup>3</sup> | Потери мономера при полимеризации, $W_{\text{мах}} \cdot M$ , кг/м <sup>3</sup> | Предел прочности при сжатии, МПа |                        | Коэффициент абсолютного упрочнения $\frac{R_{6п}}{R_6}$ |
|--------------|------|----------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|
|              |      |                |                                                                   |                                                              |                                                                                 | бетон $R_6$                      | бетонополимер $R_{6п}$ |                                                         |
| А-3          | 0,68 | А              | 76                                                                | 73                                                           | 4,21                                                                            | 24,0                             | 4,0                    | 1,71                                                    |
|              |      | Б              | 122                                                               | 116                                                          | 5,11                                                                            |                                  | 102,0                  | 4,25                                                    |
|              |      | Г              | 140                                                               | 134                                                          | 4,81                                                                            |                                  | 114,0                  | 4,75                                                    |
| А-1          | 0,55 | А              | 70                                                                | 68                                                           | 3,62                                                                            | 33,0                             | 47                     | 1,42                                                    |
|              |      | Б              | 113                                                               | 109                                                          | 3,95                                                                            |                                  | 106,0                  | 3,21                                                    |
|              |      | Г              | 134                                                               | 131                                                          | 2,33                                                                            |                                  | 121,0                  | 3,67                                                    |
| А-2          | 0,35 | А              | 64                                                                | 61                                                           | 4,53                                                                            | 51,0                             | 72,0                   | 1,41                                                    |
|              |      | Б              | 105                                                               | 101                                                          | 4,16                                                                            |                                  | 130,0                  | 2,55                                                    |
|              |      | Г              | 25                                                                | 120                                                          | 4,55                                                                            |                                  | 149,0                  | 2,92                                                    |

летучими веществами и поэтому при отверждении их в поровой структуре неизбежны потери мономера при испарении, которые обычно предотвращаются погружением пропитанного материала под слой жидкости, например, воды. Однако, находясь под нагретой до 80—85°C водой, мономер продолжает испаряться до тех пор, пока не вступит в реакцию полимеризации. Как видно из табл. 4.3, потери мономера при полимеризации в горячей воде составили вследствие испарения 4,5—5% всей массы мономера, поглощенной бетоном.

Испарение мономера, приводящее к удорожанию бетонополимера и вызывающее большую загрязненность воздуха внутри помещения, можно, на наш взгляд, уменьшить двумя путями: повышением скорости полимеризации и давления герметизирующей среды.

В случае, когда к внешнему виду бетонополимерного изделия не предъявляются специальные требования, отверждение пропиточного состава можно проводить в нагретой вязкой жидкости, на-

На рис. 4.3 показаны кривые поглощения мономера при пропитке бетонных образцов серий А-1 и А-2, построенные на основе степенных уравнений (4.3).

Как и следовало ожидать, предварительное вакуумирование (режим Б) резко (на 50—70%) увеличивает количество поглощенного бетонными образцами мономера по сравнению с пропиткой по режиму А. Применение избыточного давления повышает эту величину до 90—100%.

Анализ кривых (рис. 4.3) показывает, что при всех режимах пропитки в течение первого часа поглощается около 70—80% мо-

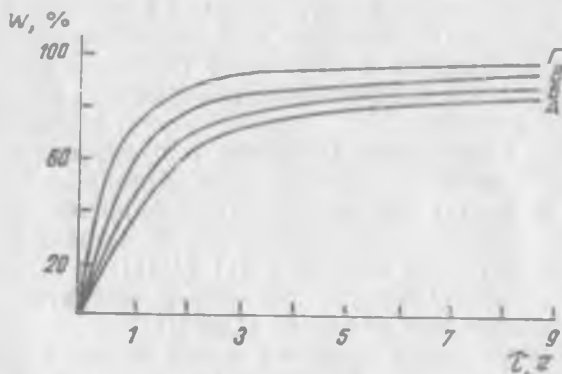


Рис. 4.3. Зависимость от времени степени насыщения образцов по режимам А, Б, В и Г.

номера от максимально возможной величины  $W_{\max}$ . Через три часа после начала пропитки величина  $W$  составляет уже 90—95% от  $W_{\max}$ . Причем этот процесс развивается тем интенсивнее, чем больше величина избыточного давления при пропитке бетона мономером.

Аналитическое дифференцирование уравнения (4.3) позволяет получить уравнение скорости пропитки бетона мономером  $dW/d\tau$  в зависимости от времени:

$$\frac{dW}{d\tau} = - \frac{0,5 W_{\max}^2 \tau}{V \tau} (1 + V \tau).$$

Знак минус в правой части уравнения (4.4) указывает на уменьшение скорости пропитки  $dW/d\tau$  во времени, причем наиболее интенсивно для менее плотного бетона. Это объясняется более пористой структурой бетонных образцов серии А-1 и повышением В/Ц отношения. При увеличении продолжительности пропитки значения ее скорости для бетонов обеих серий практически одинаковы, что свидетельствует о дополнении наиболее тонких пор и капилляров, объем и размеры которых у бетонов серий А-1 и А-2 практически одинаковы.

Влияние режимов пропитки на прочностные показатели бетонополимера хорошо видно из данных табл. 4.3. Как видно, вакуумиро-

вание и избыточное давление при пропитке резко повышают прочность бетонополимеров по сравнению с бетонами, пропитанными по режиму А. Причем для бетонополимера, полученного на основе более плотного бетона серии А-2 с использованием предварительного вакуумирования и избыточного давления при пропитке, прирост прочности значительно выше. В то же время, для достижения в практических целях предела прочности бетонополимера, при сжатии порядка 100—120 МПа, достаточно использовать при пропитке бетонов марок 200—500 только предварительное вакуумирование, не применяя повышенное давление.

Известно [28, 111], что пропиточные составы на основе виниловых мономеров (метилметакрилата, стирола) являются легко

Таблица 4.3

Влияние режима пропитки на прочностные показатели бетонополимера

| Серия бетона | В/Ц  | Режим пропитки | Расход мономера при пропитке<br>$W_{\text{max}}, \text{кг/м}^3$ | Содержание полимера в бетонополимере<br>$M, \text{кг/м}^3$ | Потери мономера при полимеризации,<br>$\frac{W_{\text{max}} - M}{M} \cdot 100$ | Предел прочности при сжатии, МПа |                           | Коэффициент абсолютного упрочнения<br>$\frac{R_{6п}}{R_6}$ |
|--------------|------|----------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|
|              |      |                |                                                                 |                                                            |                                                                                | бетонный бетон<br>$R_6$          | бетонополимер<br>$R_{6п}$ |                                                            |
| А-3          | 0,68 | А              | 76                                                              | 73                                                         | 4,21                                                                           | 24,0                             | 4,0                       | 1,71                                                       |
|              |      | Б              | 122                                                             | 116                                                        | 5,11                                                                           |                                  | 102,0                     | 4,25                                                       |
|              |      | Г              | 140                                                             | 134                                                        | 4,81                                                                           |                                  | 114,0                     | 4,75                                                       |
| А-1          | 0,55 | А              | 70                                                              | 68                                                         | 3,62                                                                           | 33,0                             | 47                        | 1,42                                                       |
|              |      | Б              | 113                                                             | 109                                                        | 3,95                                                                           |                                  | 106,0                     | 3,21                                                       |
|              |      | Г              | 134                                                             | 131                                                        | 2,33                                                                           |                                  | 121,0                     | 3,67                                                       |
| А-2          | 0,35 | А              | 64                                                              | 61                                                         | 4,53                                                                           | 51,0                             | 72,0                      | 1,41                                                       |
|              |      | Б              | 105                                                             | 101                                                        | 4,46                                                                           |                                  | 130,0                     | 2,55                                                       |
|              |      | Г              | 25                                                              | 120                                                        | 4,55                                                                           |                                  | 149,0                     | 2,92                                                       |

летучими веществами и поэтому при отверждении их в поровой структуре неизбежны потери мономера при испарении, которые обычно предотвращаются погружением пропитанного материала под слой жидкости, например, воды. Однако, находясь под нагретой до 80—85°C водой, мономер продолжает испаряться до тех пор, пока не вступит в реакцию полимеризации. Как видно из табл. 4.3, потери мономера при полимеризации в горячей воде составили вследствие испарения 4,5—5% всей массы мономера, поглощенной бетоном.

Испарение мономера, приводящее к удорожанию бетонополимера и вызывающее большую загрязненность воздуха внутри помещения, можно, на наш взгляд, уменьшить двумя путями: повышением скорости полимеризации и давления герметизирующей среды.

В случае, когда к внешнему виду бетонополимерного изделия не предъявляются специальные требования, отверждение пропиточного состава можно проводить в нагретой вязкой жидкости, на-



пример, в битуме [90] или в петролатуме [21, 47]. Процесс полимеризации в нагретом петролатуме не только способствует задержанию мономера при отверждении, но и создает на поверхности изделия после завершения процесса гидронизолирующий слой, заполненный петролатумом, который при обычной термokatалитической полимеризации под водой, как правило, отощается на 1—2 мм. Таким образом, создается высокопрочный материал с изолирующей гидрофобной поверхностью, который может широко применяться в энергетическом строительстве.

## **Глава 5. ВНУТРЕННЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНОПОЛИМЕРА**

### **5. 1. Деформации бетона в процессе получения бетонополимеров**

Процесс модифицирования бетона протекает в несколько стадий, при этом каждой из них присущи специфические условия среды, которые действуют на бетон.

Рассмотрим основные стадии модифицирования и их влияние на физико-механические свойства бетона: первая — высушивание бетона тем или иным способом; вторая — пропитка бетона мономером при атмосферном или избыточном давлении; третья — полимеризация мономера либо термokatалитическим, либо радиационным методами.

Основная задача первой стадии — удаление физико-механически и адсорбционно связанной воды из тела бетона. Одновременно с этим происходит влажностная усадка. При повышенных температурах протекают два взаимосвязанные процесса — термо- и влажностные деформации бетона. Если первый процесс способствует увеличению, то, второй, наоборот, сокращению линейных размеров бетонного образца.

Высушивание бетонных призм серии А-1 производили при температурах от 40 до 120°C с интервалом 20°C. На каждом интервале температура образца поддерживалась на постоянном уровне в течение одного часа. Продолжительность опыта трое суток. Деформацию образцов дважды определяли на каждом уровне температуры.

Для определения чисто температурных деформаций были использованы контрольные высушенные призмы той же серии. В качестве эталонных были взяты бетонополимерные призмы.

На рис. 5.1, а показаны кривые, которые характерны для указанных трех типов деформаций, а на рис. 5.1 б дают представление о величине деформаций при различных температурах нагрева и остывании образцов. Отмечено, что деформации высушенного бетона и бетонополимера существенно не различаются при возрастании температуры и вполне подчиняются линейному закону.

Полимер, образующийся в порах, прочно сцепляется со скелетом бетона, поэтому при воздействии на них температуры они деформируются как единая система.

Коэффициент линейного температурного расширения до температуры размягчения полимера можно определить по формуле

$$\alpha_{\delta n} = \frac{\alpha_6 + \alpha_n \cdot \frac{V_n}{V_6} \cdot \frac{K_n}{K_6}}{1 + \frac{V_n}{V_6} \cdot \frac{K_n}{K_6}}, \quad (5.1)$$

где  $\alpha_6$ ,  $\alpha_n$  — коэффициент линейного температурного расширения соответственно бетона и полимера;

$V_6$ ,  $K_6$  — объем и модуль упругости скелета бетона;

$V_n$ ,  $K_n$  — объем и модуль упругости полимера в порах бетона.

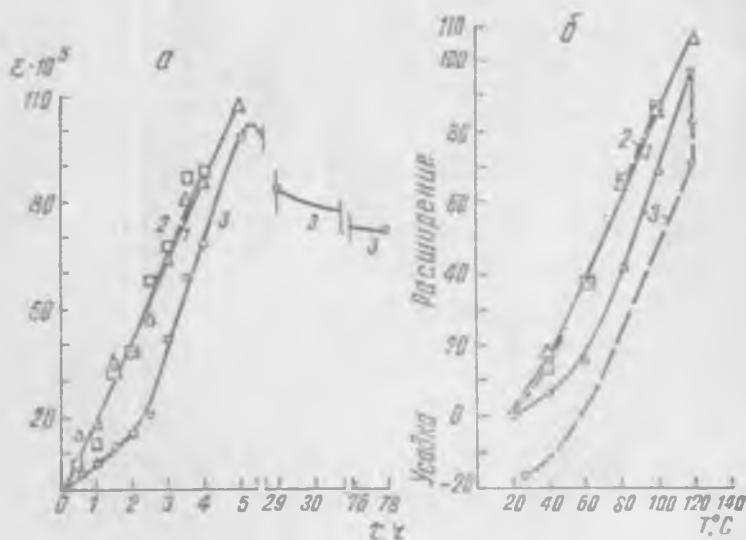


Рис. 5.1. Зависимость развития температурно-влажностных деформаций во времени (а) и повышения температуры (б).

1 — тяжелый бетон, высушенный до постоянного веса (эталон); 2 — бетонополимер на матрице высушенного бетона; 3 — высушиваемый тяжелый бетон.

Коэффициенты температурного расширения соответственно равны

$$\alpha_6 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}; \alpha_n = 10 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}.$$

Объемные модули упругости определяем по формулам

$$K_6 = \frac{E_6}{3(1-2\mu_6)} = \frac{2.4 \cdot 10^4}{3(1-2 \cdot 0.2)} = 1.3 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad (5.2)$$

$$K_n = \frac{E_n}{3(1 - 2\alpha_n)} = \frac{2 \cdot 10^5}{3(1 - 2 \cdot 0.3)} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ МПа.} \quad (5.3)$$

Объемы полимера и скелета бетона связаны между собой отношением вида  $V_n = V_6 \frac{\gamma_6 M}{\gamma_n}$ , поэтому при содержании полимера  $M = 5\%$  и  $\gamma_6 = 2,4 \text{ т/м}^3$ ,  $\gamma_n = 1,2 \text{ т/м}^3$  получим  $V_n/V_6 = 0,1$ , а подставляя приведенные данные в (5.1),  $-\alpha_{6n} = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ .

По опытным данным (рис. 5.1), коэффициент линейного температурного расширения бетонополимера  $\alpha_{6n} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ .

Следует отметить, что характер нарастания деформаций высушиваемого бетона не подчиняется линейному закону, особенно на начальных этапах высушивания. Деформации (рис. 5.1, кривая 3) значительно отстают от эталонных, хотя в дальнейшем все три кривые имеют тенденцию к сближению.

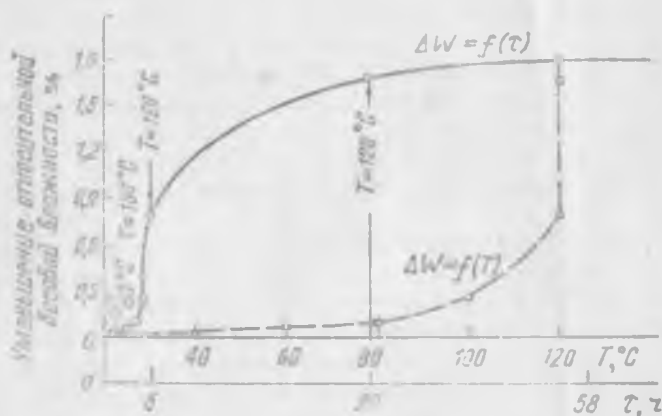


Рис. 5.2. Зависимость влагопотерь при высушивании бетона от времени  $\Delta W = f(\tau)$  и повышения температуры  $\Delta W = f(T)$ .

Выдерживание бетона при постоянной температуре  $120^\circ\text{C}$  на конечном этапе его высушивания приводит к завершению процесса испарения влаги и достаточно четкому проявлению усадочных явлений в бетоне. Представленная кривая изменения влажности в бетоне (рис. 5.2) хорошо коррелирует с кривой температурно-влажностных деформаций (рис. 5.1). Наиболее интенсивному уменьшению весовой относительной влажности бетона, равной  $0,9\%$ , соответствует относительная его усадка  $\epsilon_y = 18 \cdot 10^{-5}$ .

На третьи сутки нагрева при температуре  $120^\circ\text{C}$  величина влажностно-температурной усадки  $\epsilon_y = 29 \cdot 10^{-5}$ . Величина деформации усадки высушенного бетона может быть подсчитана с учетом ли-

нейной зависимости между изменением влажности и деформации усадки по известному выражению С. В. Александровского [1]:

$$\epsilon_s = \beta \Delta u, \quad (5.4)$$

где  $\beta = 3,0 \cdot 10^{-2}$  — коэффициент линейной деформации усадки бетона.  $\Delta u = 1,8 \cdot 10^{-2}$  г/г — изменение стносительной весовой влажности, полученной в опыте.

После охлаждения бетон сухой, поэтому полную деформацию определяем только как температурную (рис. 5.1, кривая 3).

Результаты опытов, проведенные в НИИЖБе под руководством А. Ф. Милованова [59], подтверждают данные, полученные в наших экспериментах. В опытах И. М. Карасева [35] расширение бетона при нагреве было значительнее, чем его усадка. В основном деформации усадки в бетоне наблюдались при выдержке лишь через сутки его нагрева и развивались с уменьшением влажности бетона. Так, при  $120^\circ\text{C}$  влажность уменьшилась с 3,5 до 1,4%, а деформация усадки достигла  $35,7 \cdot 10^{-5}$ . Отмечается резкое возрастание коэффициента линейной усадки при влажности бетона менее 2%. Это следствие того, что влага с повышением температуры удаляется из бетона с большей интенсивностью энергии связи.

Вторая стадия модифицирования заключается в пропитке высушенного бетона мономером. В качестве мономера принят мало вязкий метилметакрилат.

Пропитка осуществлялась двумя способами: в первом — производилось вакуумирование и дальнейшая пропитка при атмосферном давлении, во втором — вакуумирование и дальнейшая пропитка при избыточном давлении. В процессе пропитки замеряли деформации образцов.

Предполагалось, что при пропитке бетона мономером должны быть зафиксированы деформации расширения бетона. Однако эти предложения оказались ошибочными. Опыты, неоднократно повторенные на бетонных образцах, показали деформацию укорочения бетона. По-видимому, это объясняется специфическими свойствами мономера, не вступающего в химико-физический контакт с цементным камнем, а наличие деформаций укорочения связано с движением жидкости по тонким капиллярам и формой ее мениска. Замеренные в опыте относительные деформации укорочения были равны  $10 \cdot 10^{-3}$ .

На рис. 5.3 приведены данные о величинах деформаций и характере их роста при охлаждении образцов после сушки, пропитки мономером и дальнейшей полимеризации мономера термokatалитическим способом.

Третья стадия наиболее ответственная в формировании новой композиционной структуры бетона и заключается в отверждении мономерами. В экспериментальных исследованиях был принят наиболее распространенный метод термokatалитического отверждения мономера, который заключается в том, что пропитанные образцы

помещаются в ванну с водой, нагретой до 80—90°C, и выдерживаются в ней в течение 24 ч.

Измерение продольных деформаций образцов производили через 2, 4, 24 и 96 ч при температурах бетона соответственно 80°C, 40°C и лабораторного помещения.

При полимеризации происходит контракционная усадка мономера, что и определяет скачкообразный спад на кривой деформации, отмеченный через 4 ч после погружения образцов в ванну с горячей водой. В дальнейшем этот процесс удлиняется и помимо усадки проявляется действие перепада температуры при остывании

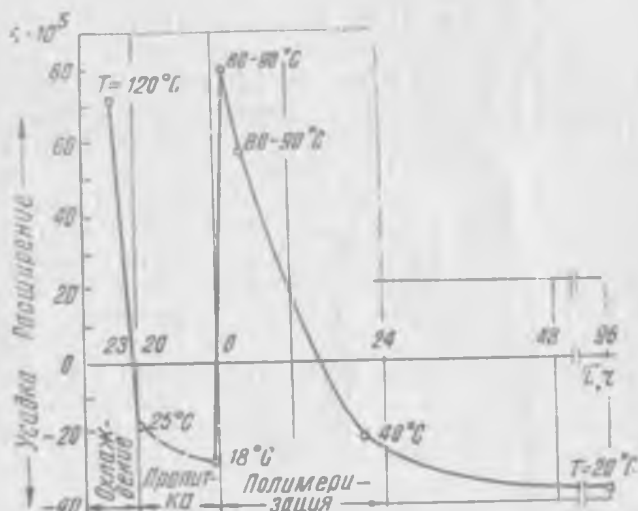


Рис. 5.3. Характерные кривые деформаций при охлаждении высушиваемого бетона, его пропитке мономером и термокаталитической полимеризации.

заполимеризовавшейся композиции, усадочные деформации равны  $(23—26) \cdot 10^{-5}$ .

Таким образом, величина общей деформации укорочения за весь цикл модификации довольно велика: в нее входят собственно деформации усадки, деформации укорочения при пропитке и полимеризации.

Опыты, проведенные Ю. В. Егоровым [24], показали, что при отверждении мономера метилметакрилата в теле бетона термокаталитическим способом выявлена усадка композиционной структуры бетонополимера. Относительная деформация усадки бетона, зафиксированная в опытах,  $\epsilon_y = 6,5 \cdot 10^{-5}$  при полимеризации мономера и  $\epsilon_y = 1,5 \cdot 10^{-5}$  при пропитке.

Полученная в опытах [36] конечная деформация усадки при пропитке и полимеризации более чем в два раза превышает ука-

занные выше деформации. Это обусловлено тем, что в работе [24] ставилась ограниченная задача такого типа.

В специальных опытах Г. И. Горчакова и В. Н. Баженовой [76] также вскрыты собственные деформации укорочения бетона при радиационном отверждении мономера в его теле. Авторы установили, что суммарное значение относительных усадочных деформаций равно  $40 \div 60 \cdot 10^{-5}$  и колеблется в зависимости от вида бетона и количества введенного полимера.

По экспериментальным данным американских исследователей [115], при пропитке бетона метилметакрилатом и дальнейшей его полимеризации происходят относительно большие усадочные деформации бетонополимера (до  $30 \cdot 10^{-5}$ ). Эти деформации пропорциональны концентрации полимера в бетоне.

Опытами японских исследователей [98] установлена зависимость усадки бетонополимера от привеса полимера при полимеризации, причем в степенной функции. Так, при привесе полимера 15% относительная величина деформаций усадки составляла около  $300 \cdot 10^{-5}$ .

Деформации укорочения бетона [36, 71] являются следствием контракции полимеризационного продукта (мономера) и начинают действовать сразу же после прекращения тепловыделений. В связи с этим в бетоне развиваются сжимающие, а в полимере растягивающие напряжения. При этом в результате проявления ползучести релаксация напряжений в полимере протекает значительно быстрее, чем в бетоне. Композиционная структура значительно уплотняется, чем в определенной степени можно объяснить повышение прочностных и деформативных характеристик бетонополимера.

По результатам проделанных опытов можно сделать следующие выводы:

1. Формирование структуры бетонополимера происходит на трех основных стадиях модифицирования, причем основной следует считать полимеризацию мономера;

2. Усадочные деформации при модифицировании могут достигать значительных величин, особенно на конечном этапе, чем можно объяснить уплотнение структуры, возникновение внутренних напряжений и соответственно улучшение физико-механических характеристик качественно нового материала.

## 5. 2. Напряжения в составляющих компонентах бетонополимера

При получении бетонополимера наблюдаются в основном два состояния, вызывающие появление вынужденных деформаций бетона-матрицы и связанные с этим напряженно-деформированное состояние бетонополимера.

Первое состояние отмечается в начале термokatалитического отверждения мономера в порах бетона. Превращение мономера в

полимер приводит к существенной деформации линейной усадке последнего, достигающей 3—5%. Ввиду того, что указанная деформация не может проявиться из-за жесткого каркаса бетон-матрицы, создаются предпосылки к возникновению первого напряженно-деформированного состояния композиции, вызванного усадкой полимера. При этом в полимере развиваются растягивающие, а в бетоне-матрице сжимающие напряжения. Возникновение растягивающих напряжений в полимере приводит к развитию его ползучести, что существенно отражается на величинах собственных напряжений.

Второе состояние наблюдается при остывании полученного бетонополимера вначале в водной среде, а затем на воздухе. В этом случае напряженно-деформированное состояние бетонополимера связано в основном с температурными перепадами или, точнее, с различными коэффициентами температурного линейного расширения у бетона-матрицы ( $\alpha_b$ ) и полимера ( $\alpha_n$ ), равных соответственно  $10 \cdot 10^{-6}$  и  $100 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Существенная разность ( $\alpha_n - \alpha_b$ ) и наличие градиента температуры, равного 65°C, приводит к возникновению второго напряженно-деформированного состояния композиции, которое, накладываясь на первое состояние, приводит к дальнейшему увеличению собственных напряжений в бетоне-матрице и полимере. На этом этапе также существенна роль ползучести полимера, снижающая собственные напряжения композиции.

Экспериментальные исследования [36, 71, 89] показали, что на каждом этапе получения бетонополимера наблюдались существенные деформации укорочения (усадки) композиции.

При полимеризации мономера относительные деформации укорочения бетона-матрицы были равны  $23,1 \cdot 10^{-5}$ , а к концу остывания бетонополимера оно увеличивалась на  $20,7 \cdot 10^{-5}$ .

Внутреннее напряженно-деформированное состояние бетонополимера определяли по схеме армированного в двух направлениях материала. При этом начальное уравнение равновесия усилий при условии совместных деформаций бетона-матрицы и полимера описывалось как для системы однонаправленного армированного материала. После этого, считая упругий материал анизотропным, макроскопически однородным, проводили его армирование в направлении, ортогональном первому при объемном содержании полимера (арматуры), и определяли усилия в составляющих элементах композиции [51].

Расчетная схема композиции отражена на рис. 5.4. Элементарный параллелепипед подвержен действию фиктивной внешней нагрузки  $\sigma_{bn}$  на площади  $F$  и армирован волокнами полимера с площадью  $F_n$ . От действия напряжений  $\sigma_{bn}$  возникают напряжения как в бетоне-матрице  $\sigma_b$ , так и в полимере  $\sigma_n$ .

Уравнение равновесия в сечении для однонаправленного армирования материала можно записать в виде

$$F_n \sigma_n(t) + (F - F_n) \sigma_0(t) = F \sigma_{0n}(t). \quad (5.5)$$

Обе составляющие материала деформируются совместно. Поскольку принимается их полное сцепление и линейная упругость, то имеет место равенство деформаций

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_0(t) = \frac{\sigma_0(t)}{E_0} = \frac{\sigma_n(t)}{E_n}. \quad (5.6)$$

Из (5.5) после соответствующих преобразований получаем напряжения в составляющих элементах композиции:

$$\sigma_n(t) = \frac{\sigma_{0n}(t) - (1 - \mu) \sigma_0(t)}{\mu}, \quad (5.7)$$

$$\sigma_0(t) = \frac{\sigma_{0n}(t) - \mu \sigma_n(t)}{1 - \mu}, \quad (5.8)$$

где  $\mu = \frac{F_n}{F}$  — коэффициент армирования бетона-матрицы полимером.

В связи с тем, что ползучестью обладает только армирующий материал, основное уравнение его деформирования записываем в виде

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_n^0 + \frac{\sigma_n(t)}{E_n(t)} + \int_{\varepsilon_n^0}^t \frac{\sigma_n(\tau)}{E_n(\tau)} L(t, \tau) d\tau. \quad (5.9)$$

Вводя в (5.9) значение напряжения  $\sigma_n(t)$  из (5.7) и учитывая условие (5.6), а также принимая величину фиктивного напряжения  $\sigma_{0n}(t)$  равной нулю, после преобразования имеем интегральное уравнение для напряжений в бетоне-матрице от вынужденной деформации усадки полимера  $\varepsilon_n^0$ :

$$\sigma_0(t) = \frac{\varepsilon_n^0 E_0 \mu n}{1 + \mu(n-1)} - \frac{(1-\mu)}{1 + \mu(n-1)} \int_{\varepsilon_n^0}^t \sigma_0(\tau) L(t, \tau) d\tau, \quad (5.10)$$

где  $n = \frac{E_n}{E_0}$ .

Соответственно для напряжений в полимере

$$\sigma_n(t) = -\frac{1-\mu}{\mu} \left[ \frac{\varepsilon_n^0 E_0 \mu n}{1 + \mu(n-1)} - \frac{(1-\mu)}{1 + \mu(n-1)} \int_{\varepsilon_n^0}^t \sigma_0(\tau) L(t, \tau) d\tau \right]. \quad (5.11)$$

Знак минус указывает на то, что эти напряжения являются растягивающими.

Для решения уравнений (5.10), (5.11) необходимо иметь аналитическое выражение для деформаций ползучести полимера при



соответствующих условиях, характеризующихся температурой и растягивающими напряжениями в полимере. На рис. 5.5 показана кривая удельных деформаций ползучести полиметилметакрилата, полученная при температуре 65°C и растягивающих напряжениях  $\sigma_n = 15,0$  МПа.

Основное уравнение ползучести для полимера принято по теории упругой наследственности, постулирующей полную обратимость

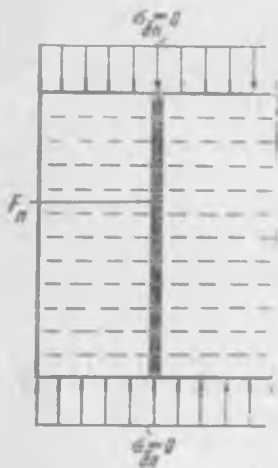
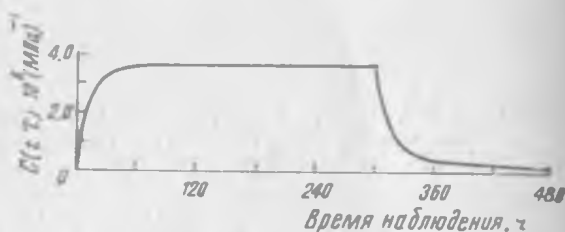


Рис. 5.4. Расчетная схема сечения, армированного в двух направлениях.

Рис. 5.5. Кривая удельных деформаций ползучести полимера ПММА при температуре 65° и растягивающих напряжениях  $\sigma_n = 15$  МПа.



деформаций ползучести при загрузении материала. Вид аналитической аппроксимации принят в форме

$$C(t - \tau) = C_1 [1 - e^{-\gamma(t - \tau)}], \quad (5.12)$$

где  $C_1$  — предельная величина ползучести, равная  $35,7 \cdot 10^{-5}$ , (МПа) $^{-1}$ ;

$\gamma$  — коэффициент, определяющий скорость нарастания ползучести, равный 0,083, ч $^{-1}$ .

Решение интегрального уравнения (5.10) приводит к виду

$$\sigma_0(t) = \frac{\epsilon_n^0 E_0 \mu n}{1 + \mu(n-1)} \left[ 1 - \int_0^t H(t - \tau) d\tau \right], \quad (5.13)$$

где  $H(t - \tau)$  — резольвента ядра интегрального уравнения, которая определена для наследственно упругого тела в форме

$$H(t - \tau) = \frac{1 - \mu}{1 + \mu(n-1)} E_0 C_1 \gamma e^{-\gamma(1 + E_0 C_1)(t - \tau)}. \quad (5.14)$$

После подстановки (5.14) в (5.13) и последующего интегрирования определяем напряжение в бетоне-матрице с учетом ползучести полимера:

$$\sigma_0(t) = \frac{\varepsilon_n^0 E_0 \mu n}{1 + \mu(n-1)} \left[ 1 - \frac{(1-\mu) E_n C_1}{[1 + \mu(n-1)](1 + E_n C_1)} \times \right. \\ \left. \times \left( 1 - e^{-\gamma_1 (1 + E_n C_1) t} \right) \right] \quad (5.15)$$

и соответственно напряжение в полимере

$$\sigma_n(t) = - \frac{1-\mu}{\mu} \sigma_0(t). \quad (5.16)$$

Таким образом, формулы (5.15) и (5.16) отражают физический процесс, протекающий при полимеризации мономера в поровом пространстве бетона-матрицы.

Второе напряженно-деформированное состояние бетонополимера определяем приведенными выше закономерностями путем замены  $\varepsilon_n^0$  на  $(\alpha_n - \alpha_0) \Delta T(t)$ .

Некоторые физические соотношения, важные при подсчете напряжений на первом и втором состояниях бетонополимера при его получении, определены как в опытах, так и заимствованы из литературных источников.

Коэффициент армирования  $\mu$  устанавливаем по величине содержания полимера в бетоне-матрице по массе или объему:

$$\mu = \frac{F_n}{F_0} = \frac{V_n}{V_0} = \frac{\gamma_0 M}{\gamma_n}, \quad (5.17)$$

где  $\gamma_n$  и  $\gamma_0$  — объемные массы полимера и бетона-матрицы;

$M$  — содержание полимера в бетоне по массе, кг/м<sup>3</sup>.

Модуль упругости полимера зависит от температуры среды и описывается формулой

$$E_n(t) = E_0 e^{-\gamma_1 (\Delta T e^{-\beta t} - 10)}, \quad (5.18)$$

где  $E_0$  — модуль упругости полимера (полиметилметакрилата) при температуре 30°C;  $\gamma_1$ ,  $\beta$  — коэффициенты, определяющие соответственно скорость нарастания модуля упругости при уменьшении температуры (в град<sup>-1</sup>) и скорость уменьшения температуры полимера (в ч<sup>-1</sup>);  $\Delta T$  — расчетный перепад температуры при охлаждении полимера в теле бетона.

Модуль упругости полимера при оценке первого напряженно-деформированного состояния следует принимать постоянным и не зависящим от изменения температуры, т. е.  $\Delta T = \text{const}$  и  $t = 0$ .

При оценке второго напряженно-деформированного состояния модуль упругости полимера уже существенно зависит от температуры и времени  $t$ , поэтому в (5.15) и (5.16) функции  $n(t) =$

$$= \frac{E_n(t) \gamma}{E_0}, \quad \Delta T(t) \text{ и } E_n(t) \gamma \text{ будут переменными.}$$



тывании бетонополимера, т. е. суммарные снижающие напряжения в бетоне-матрице:  $\sigma_b(t) = \sigma_b(t)_1 + \sigma_b(t)_2 = 9,7 + 1,2 = 10,9$  МПа  $t \rightarrow \infty$  и суммарные растягивающие напряжения в полимере  $\varepsilon_n(t) = \varepsilon_n(t)_1 + \varepsilon_n(t)_2 = -75,2 - 9,35 = 84,6$  МПа.

Как видно, бетонополимер представляет собой объемно-напряженное тело с усилиями, уравниваемыми в своем объеме. Объемные силы, создающие такой же эффект всестороннего обжа-

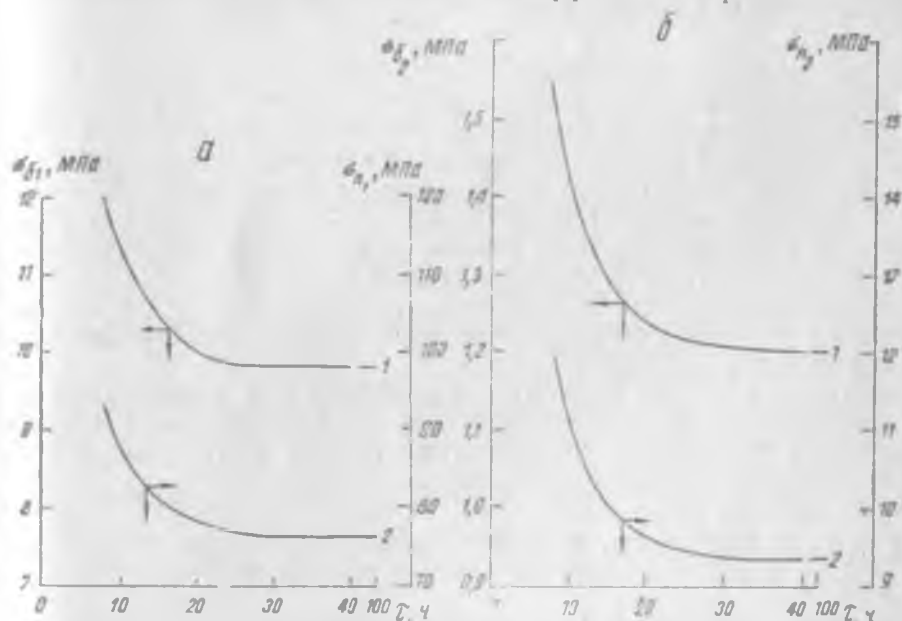


Рис. 5.6. Внутренние растягивающие напряжения в полимере (2) и сжимающие в бетоне (1) для первого (а) и второго (б) напряженно-деформированных состояний.

тия, могут определяться по действию на тело гидростатической нагрузки интенсивностью  $P$ :

$$P = \frac{\varepsilon_b E_b}{1 - 2\nu_b} \quad (5.19)$$

где  $\varepsilon_b$  — относительная деформация бетона по направлению действия нагрузки;

$\nu_b$  — коэффициент Пуассона бетона-матрицы.

Определенный интерес представляет оценка прочности бетонополимера при сжатии его осевой нагрузки и наличия бокового обжатия. Для тел, находящихся в таких условиях, величину осевой сжимающей нагрузки  $\sigma_0$ , необходимой для погашения бокового обжатия  $\sigma_0$ , подсчитываем по формуле

$$\sigma_0 = \frac{1 - \nu_{6n}}{\nu_{6n}} \sigma_6 \quad (5.20)$$

Для рассматриваемого случая  $\sigma_6 = P$ , поэтому в дальнейшем, при погашении бокового обжатия, бетонополимерный образец работает под нагрузкой как бетонная матрица, дисперсионно-армированная волокнами полимера. В связи с этим прочность бетонополимера  $R_{6n}$  на осевое сжатие складывается из двух составляющих: напряжения  $\sigma_0$  и напряжения  $kR_6$ :

$$R_{6n} = \sigma_0 + kR_6, \quad (5.21)$$

где  $R_6$  — прочность бетона-матрицы;

$k$  — эмпирический коэффициент увеличения прочности бетонной матрицы дисперсионно-армированной полимером.

Изучение структурных особенностей бетонополимерных материалов, проведенное Ю. М. Баженовым [75], показало, что в полимере, заполняющем поры бетона, наблюдается сеть коротких волосовидных трещин, пересекающихся под различными углами. Автор указывает, что образование этих трещин, вероятно, связано с развитием внутренних напряжений в полиметилметакрилате в процессе его полимеризации.

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что при расчете прочности бетонополимера необходимо учитывать внутреннее напряженно-деформированное состояние получаемой композиции.

## Глава 6. ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНОПОЛИМЕРА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

### 6. 1. Кубиковая прочность

В настоящее время накоплено много экспериментальных данных о прочности и деформативности бетонов, полностью пропитанных полимером, в которых в качестве модификатора бетона принимался в основном полимер метилметакрилат (ПММА). Прочность бетонополимера, по мнению Ю. М. Баженова [75], зависит главным образом от свойств исходного бетона-матрицы, свойств полимерной фазы и характера взаимодействия между ними.

В общем виде прочность бетонополимера можно представить как функцию нескольких параметров:

$$R_{6n} = f(R_6, R_n, M, F_{na}), \quad (6.1)$$

где  $R_6, R_n$  — прочности бетона-матрицы и полимера;  $M$  — содержание полимера в бетоне-матрице по массе;

$F_{na}$  — удельная поверхность взаимодействия между полимером и бетоном-матрицей.

Кроме того, на прочность бетонополимера значительно влияет остаточная пористость, получаемая как разность объема пор бетона-матрицы и объема полимера, заполняющего поры.

Для описания прочности бетонополимера применяются в основном два класса формул [76, 96]: первый — формулы, указывающие на зависимость прочности бетонополимера в основном от его пористости, и второй — зависимость от прочности бетона-матрицы и количества полимера в нем.

Рассмотрим достоинства и недостатки наиболее интересных зависимостей.

Установлено, что прочность бетонополимера можно описать в виде линейных и степенных зависимостей. Так, в работе [75] предлагается прочность бетонополимера, пропитанного метилметакрилатом, определять по формуле

$$R_{\text{бп}} = 1993 - 102 \cdot 10^2 P, \quad (6.2)$$

а для бетонов, пропитанных стиролом, справедливо выражение

$$R_{\text{бп}} = 1597 - 107 \cdot 10^2 P, \quad (6.3)$$

где  $R_{\text{бп}}$  — прочность бетонополимера, МПа;  $P$  — пористость бетона, %.

В работе для определения прочности бетонополимера [65] предложена эмпирическая формула вида

$$\sigma_{\text{сж}} = 256 (1 - P)^{10,1}, \quad (6.4)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  — предельное напряжение в сечении элемента при кратковременном нагружении;

$P$  — остаточная пористость после пропитки бетона-матрицы.

Выражение (6.4) более приемлемо. Действительно, при пропитке бетона происходит как бы искусственное залечивание дефектов структуры, кольматация пор и капилляров. Однако все же крупные поры и пустоты наполняются полимером неполностью [75, 53]. В большинстве случаев полимер распределяется в них по краям, закрывает вход и не заполняет полость пор. В связи с этим возникает вопрос, о какой остаточной пористости идет речь и каким образом она должна определяться. По-видимому, класс формул, построенный в виде зависимости прочности только от пористости, в практике проектирования бетонополимера не найдет широкого применения. К тому же такие формулы для оценки прочности частично пропитанного бетона практически не пригодны.

Второй класс формул, определяющих прочность бетонополимера, довольно разнообразен и на отдельных этапах, и для отдельных бетонов дает хорошую сходимость:

$$R_{\text{бп}} = A + Bf(R_0, M), \quad (6.5)$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, определяемые из опыта;

$f(R_6, M)$  — зависимость прочности бетонополимера от прочности бетона-матрицы и содержания полимера в нем.

Цель исследований, проведенных Г. С. Ивановым [76], — увязать прочность бетонополимера с такими технологическими факторами, как время вакуумирования, время пропитки и разряжения в аппаратуре пропитки.

Автором [65] предложена следующая зависимость:

$$\frac{R_{6n}}{R_6} = 1 + 7 \cdot I^{2.1}, \quad (6.6)$$

где  $I$  — функция, зависящая от технологических факторов при получении бетонополимера, имеющая вид

$$I = 0,51 + 0,048 \left( \frac{\tau_v - 15}{5} \right) + 0,046 \left( \frac{\tau_{np} - 20}{10} \right) + 0,3 \left( \frac{p_v - 0,55}{0,41} \right) + 0,092 \left( \frac{p_v - 0,55}{0,45} \right)^2, \quad (6.7)$$

где  $\tau_v$  — время вакуумирования, мин;

$\tau_{np}$  — время пропитки (мин), которое определяется по формуле

$$\tau_{np} = 199 - 2,09 \tau_v - 28,2 p_v - 119 - 119 p_v^2. \quad (6.8)$$

$p_v$  — вакуум в аппарате, МПа.

Анализ формулы (6.6) с учетом (6.7) и (6.8) показывает, что решение не является общим и действует в строго ограниченных рамках. Кроме того, оно обладает существенными противоречиями. Если, например, проводить пропитку при атмосферном давлении, то время процесса увеличивается до максимума (6.8), так как  $\tau_v = 0$ ,  $p_v = 0,1$  МПа, в результате  $\frac{R_{6n}}{R_6} = k_{ynp}$  и равно 9,4.

В то же время при глубоком вакууме  $\tau_v = 15$  мин,  $p_v = 0,014$  МПа,  $\tau_{np} = 167$  мин имеет  $k_{ynp} = 7,33$ . Приведенные выкладки противоречат здравому смыслу, поэтому решение (6.6) следует считать не объективным.

Сотрудниками ВНИИЖелезобетона [76] для определения прочности бетонополимера предложено выражение в виде

$$R_{6n} = A \cdot C_p^B + D, \quad (6.9)$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, получаемые в опыте;  $C_p$  — содержание полимера, %;  $D$  — прочность бетона-матрицы, МПа.

К сожалению, авторы, видимо, исследовали только одну марку бетона-матрицы, потому что получена окончательная формула вида, которую невозможно распространить на бетоны-матрицы другой прочности

$$R_{\text{бм}} = 4,1 \cdot C_{\text{п}}^{1,69} + 52,5. \quad (6.10)$$

Формула (6.10) довольно существенно отличается от (6.6) и более объективно отражает прочность бетонополимера.

Нами и сотрудниками НИИЖБ [22, 76] показано, что коэффициент упрочнения бетонополимера  $k_{\text{упр}}$  описывается в форме гиперболической кривой и зависит как от прочности бетона-матрицы, так и от содержания полимера в нем.

В целом было изучено три закономерности, которые можно выразить в следующих выражениях:

прочность бетонополимера описывается в зависимости только от прочности бетона-матрицы (гиперболическая функция),

$$k_{\text{упр}} = \frac{R_{\text{бм}}}{R_{\text{б}}} = \frac{97,7}{R_{\text{б}}} + 1,17, \quad (6.11)$$

прочность бетонополимера описывается в зависимости от прочности бетона-матрицы и содержания полимера в ней (степенная функция),

$$k_{\text{упр}} = 1 + 0,29 MR_{\text{б}}^{-0,7}, \quad (6.12)$$

то же, что и во втором случае, но с учетом затухающего характера кривой прочности бетонополимера с увеличением прочности бетона-матрицы применяется экспоненциальная зависимость

$$k_{\text{упр}} = 1 + \frac{0,97 M (1 - e^{-0,05 R_{\text{б}}})}{R_{\text{б}}}, \quad (6.13)$$

где  $M$  — содержание полимера в бетоне-матрице, кг/м<sup>3</sup>.

В табл. 6.1 представлены данные о прочности бетонов и содержании полимера в них. Для испытаний на сжатие были взяты 6 кубов 10×10×10 см. Как видно, результаты подсчета по формулам (6.11)—(6.13) довольно близки между собой. Однако применение выражения (6.13) довольно трудоемко, поэтому предлагается в дальнейшем пользоваться формулой (6.11) или (6.12), сходимость которых с экспериментальными данными намного лучше.

Математическая обработка результатов по определению содержания мономера в бетоне-матрице показала, что расход мономера при пропитке зависит от марки исходного бетона и выражается уравнением регрессии вида

$$M = 109 + \frac{630}{R_{\text{б}}}, \quad (6.14)$$

т. е. это косвенным образом подтверждает связь прочности бетонополимера с его остаточной пористостью.

Формулы второго класса применимы и для определения прочности частично пропитанного бетонополимера с полностью вы-



сушенным ядром бетона-матрицы. Обработка экспериментальных данных позволила выявить эту взаимосвязь путем введения коэффициента относительной площади пропитки  $\mu = \frac{F_n}{F_0}$ , в котором  $F_n$  — площадь сечения, заполненная полимером;  $F_0$  — площадь всего сечения.

Таблица 6.1

Прочность бетонов и содержание в них полимера

| Кубиковая прочность бетона-матрицы $R_0$ , МПа | Расход мономера $M$ , кг/м <sup>3</sup> |                   | Прочность бетонополимера при сжатии $R_{0п}$ , МПа |             |        |        |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------|-------------|--------|--------|
|                                                | опытные данные                          | по формуле (6.14) | опытные данные                                     | по формулам |        |        |
|                                                |                                         |                   |                                                    | (6.11)      | (6.12) | (6.13) |
| 15,0                                           | 152,3                                   | 150,3             | 110,0                                              | 115,3       | 113,2  | 92,3   |
| 20,0                                           | 138,6                                   | 140,0             | 123,0                                              | 121,1       | 115,7  | 106,0  |
| 25,0                                           | —                                       | 133,8             | —                                                  | 127,0       | 127,0  | 17,2   |
| 30,0                                           | 130,0                                   | 129,7             | 135,6                                              | 132,8       | 134,3  | 128,1  |
| 40,0                                           | —                                       | 124,5             | —                                                  | 144,5       | 149,2  | 144,0  |
| 50,0                                           | 119,3                                   | 121,4             | 153,0                                              | 156,2       | 164,0  | 158,3  |
| 60,0                                           | 119,0                                   | 119,3             | 177,0                                              | 167,0       | 178,2  | 170,0  |

Запишем основное уравнение, описывающее прочность бетонополимера с предварительно высушенным ядром бетона-матрицы:

$$R_{0п} = \frac{R_0}{2} [1 + e^{\mu \ln(2k_{уп} - 1)}]'. \quad (6.15)$$

Выражение (6.15) отвечает всем предельным условиям, т. е. при  $\mu=0$  прочность бетонополимера равна прочности бетона-матрицы, а при  $\mu=1$  — прочности полностью пропитанного бетонополимера.

Коэффициенты упрочнения в (6.15) могут приниматься по формулам (6.11) или (6.12), а также на основании опытных данных для конкретного технологического режима, применяемого при получении полностью пропитанного бетонополимера.

Проверка формулы (6.15) проведена на опытных данных, полученных В. А. Беликовым [76] на частично пропитанных образцах. Глубина пропитки в среднем 3 см при сечении образцов  $10 \times 10$  см. Прочность исходного бетона 32,4, бетонополимера — 103 МПа.

Если принять справедливой формулу (6.11) и подсчитать по ней коэффициент упрочнения и затем ввести его в формулу (6.15) при среднем значении  $\mu$  равном 0,8, то в результате получим прогнозируемую прочность бетонополимера 100,3 МПа, т. е. отклонение расчетного значения прочности от опытного составляет не более 3%.

В заключение следует отметить, что наиболее рационально и эффективно проводить модифицирование бетонов-матриц прочностью от 30 до 50 МПа, для которых расход мономера находится в средних пределах, а прочность на сжатие довольно высока.

## 6. 2. Призменная прочность. Расчетные характеристики бетонополимера

По аналогии СНиП II. 21-75 для нормирования расчетных сопротивлений бетонополимера при сжатии можно применить формулу

$$R_{\text{пр. бп}} = \frac{\bar{R}_{\text{бп}}}{K_{\text{бс}}} (1 - \varepsilon_{\text{бп}} C_v) C, \quad (6.16)$$

где  $R_{\text{бп}}$  — средняя кубиковая прочность бетонополимера;  $K_{\text{бс}}$  — коэффициент безопасности бетонополимера по прочности на сжатие;  $C_v$  — коэффициент вариации прочности бетонополимера при сжатии;  $\varepsilon_{\text{бп}}$  — коэффициент, определяющий изменение прочности бетонополимера от среднего до минимально возможного значения;  $C$  — коэффициент, характеризующий отношение призменной прочности к кубиковой прочности бетонополимера.

Отношение призменной  $R_{\text{пр. бп}}$  к кубиковой прочности  $R_{\text{бп}}$  бетонополимера, полученное в экспериментальных исследованиях, приближается к единице, а в отдельных экспериментах даже больше единицы. Опыты, проведенные в Гидропроекте им. С. Я. Жука, показали, что значение  $C$  может изменяться в пределах 0,89—0,943. Ниже приводятся опытные данные отношения для бетонополимеров серий А-1, А-2, А-3, полученных на бетонах-матрицах, полностью пропитанных ММА с термokatалитическим отверждением последнего.

| Показатель                                    | А-1   | А-2   | А-3   | По данным<br>Гидропроекта |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|
| $R_{\text{бп}}, \text{ МПа}$                  | 117,6 | 122,7 | 146,3 | 114,0                     |
| $\bar{R}_{\text{пр. бп}}, \text{ МПа}$        | 101,3 | 119,7 | 132,5 | 128,0                     |
| $C = \bar{R}_{\text{пр. бп}} / R_{\text{бп}}$ | 0,863 | 0,974 | 0,906 | 0,890                     |

Судя по приведенным данным,  $C=0,908$ , а коэффициент вариации — 5,2%. В дальнейших расчетах, по-видимому, следует принять  $C=0,85$ . Это объясняется тем, что экспериментальных данных по определению коэффициента  $C$  недостаточно. Многочисленные исследования, проведенные за последние годы, показывают, что бетонополимер, полученный при хорошо отработанной технологии, отличается высокой однородностью как по объемной массе, так и по прочности на сжатие. Коэффициент прочности бетонополимера при сжатии  $C_{\text{в бп}}$  должен быть выше, чем  $C_{\text{в}}$  для бетона-матрицы.

Эксперименты, проведенные в НИИЖБе, показали, что коэффициент  $C_{\text{в}}$  изменяется от 0,25 до 0,16, а иногда равен 0,25. Объяс-

нить получаемый разброс трудно, так как здесь действуют технологические факторы, обуславливаемые пропиткой и отверждением мономера, так и изменение прочности высушенного бетона-матрицы, в котором при нагреве до температуры выше  $100^{\circ}\text{C}$  происходят сложные физико-химические изменения. Причем коэффициент вариации, получаемый на кубах  $7 \times 7 \times 7$  см, обычно выше, чем  $\epsilon_{\text{вп}}$  на кубах  $10 \times 10 \times 10$  см. Поэтому, учитывая малочисленные данные исследований и с учетом запаса прочности бетонополимера, коэффициент вариации прочности бетонополимера при сжатии можно принять равным 0,15 [76, 83].

Коэффициент  $\epsilon_{\text{вп}}$  в (6.15) показывает уменьшение средней прочности бетонополимера до минимального значения для данного бетона. Вычислить его можно по формуле (6.16) путем замены прочности  $\bar{R}_{\text{вп}}$  на  $R_{\text{вп. мин}}$ , при этом  $K_{\text{вс}} = 1$ , т. е.

$$\epsilon_{\text{вп}}^{\text{max}} = \frac{\bar{R} - R_{\text{вп. мин}}}{\bar{R} C_{\text{вп}}} \quad (6.17)$$

где  $R_{\text{вп. мин}}$  — минимальная прочность бетонополимера на сжатие, полученная в эксперименте.

Теоретическая обработка экспериментальных результатов по прочности бетонополимера серий А-1, А-2, А-3 показала, что значение коэффициента  $\epsilon_{\text{вп}}$  изменяется от 1,05 до 1,59 при среднем  $\epsilon_{\text{вп}} = 1,44$ , полученном на кубах  $7 \times 7 \times 7$  и  $10 \times 10 \times 10$  см. Сравнивая полученное значение  $\epsilon_{\text{вп}}$  с рекомендуемым в СНиП II.21-75, следует указать на то, что указанный коэффициент на 12% меньше нормируемого для бетона-матрицы, который равен 1,64. Однако, учитывая недостаточность экспериментальных данных, следует принять рекомендации СНиП II.21-75. Из-за малочисленности опытных данных и несовершенства технологического процесса коэффициент безопасности для бетонополимера при сжатии следует принять равным 1,5 [83].

Дальнейшие исследования позволят уточнить коэффициенты, рассмотренные выше, а внедрение в практику строительства конструкционного материала бетонополимера — определить его значение. В табл. 6.2 приведены значения нормативных и расчетных характеристик бетонополимера, полностью пропитанного полимером ПММА, которые получены с учетом последних результатов, проведенных в НИИЖБе и других организациях [22, 69, 76, 83].

Расчетные сопротивления бетонополимера при действии многократно повторяющейся нагрузки умножаются на коэффициенты условий работы, определяемые по табл. 6.2. Коэффициенты условий работы бетонополимера  $m_{\text{вп}}$  при многократно повторяющейся нагрузке и коэффициенте асимметрии цикла  $\rho_{\text{в}}$  равном 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 соответственно равны 0,372; 0,415; 0,459; 0,502; 0,545; 0,587; 0,630; 0,673; 0,716; 0,759.

Коэффициент условий работы, учитывающий длительность действия нагрузки, при включении в расчет нагрузок, суммарная дли-

тельность действия которых мала, принимается равным 1, а при исключении их — 0,8.

Для бетонополимеров с частичной пропиткой при высушенном ядре бетона-матрицы марку следует устанавливать по формуле (6.15).

Таблица 6.2

Нормативные сопротивления бетонополимера  $R_{пр}^н$  и  $R_p^н$   
расчетные сопротивления для предельных состояний группы  
 $R_{пр}$  и  $R_p$

| Вид сопротивления                                   | Проектная марка бетона по прочности на сжатие |      |      |      |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|------|------|
|                                                     | 800                                           | 1000 | 1200 | 1400 |
| Сжатие осевое (призмная прочность) $R_{пр}^н$ , МПа | 51                                            | 64   | 77   | 91   |
| Сжатие осевое (призмная прочность) $R_{пр}$ , МПа   | 34                                            | 42,5 | 51   | 60   |
| Растяжение осевое $R_p^н$ , МПа (нормативное) •     | 5,6                                           | 5,8  | 6,3  | 6,7  |
| Растяжение осевое, $R_p$ , МПа (расчетное)          | 3,7                                           | 3,9  | 4,2  | 4,5  |

Нормативные и расчетные сопротивления частично пропитанного бетонополимера в первом приближении подсчитывают по выражению (6.16) с учетом коэффициентов, установленных СНиП II. 21-75.

### 6.3. Модуль упругости.

**Сжимаемость и растяжимость. Коэффициент поперечной деформации**

Деформативные свойства бетона принято оценивать значением модуля упругости или модуля деформаций, найденным по упругим или полным деформациям. Величина модуля деформаций, как известно, зависит не только от характеристик бетона и времени нагружений, но и от напряжения и скорости деформирования.

При «мгновенном» приложении нагрузки естественно ожидать увеличение деформаций по линейному закону и подчинению их закону Гука для идеально мгновенно-упругих систем. Однако на практике наблюдается иная картина. Наряду с ростом упругих деформаций начинают проявляться неупругие деформации или иначе деформации ползучести, которые существенно влияют на напряженно-деформированное состояние сечения элемента. Перераспределение напряжений в сечении определяется существованием упругих элементов, на которые как бы начинают перетекать и тем самым разгружаться пластические (вязкие) элементы. И чем более однороднее структура, тем меньше ползучесть влияет на изменение внутреннего напряженного состояния.

Бетон представляет собой сложную композиционную структуру, в которой большую роль играет содержащаяся в нем вода. При полном высушивании, т. е. удалении из бетона физико-механически и адсорбционно связанной воды, бетон начинает деформироваться как упругое псевдотвердое тело; при разгрузке такого элемента обычно наблюдается практически полная обратимость деформаций.

Бетонополимер, получаемый на основе сухой бетона-матрицы, должен подчиняться указанному закону деформирования.

В дальнейшем мы будем анализировать экспериментальные данные, полученные по деформированию бетонополимеров и бетонов-матриц при кратковременном нагружении, по которым оцениваются упругие и деформативные свойства последних. Величину модуля упругости бетонополимера обычно рассматривают в сравнении с модулем упругости бетона-матрицы. При таком сравнении получается довольно любопытная картина, свидетельствующая о том, что модуль упругости бетонополимера  $E_{бп}$  никак не связан с прочностью исходной матрицы и имеет определенную связь (типа линейной) с ее модулем упругости  $E_б$ .

По данным В. Н. Баженовой [75], изучавшей бетоны-матрицы с различными прочностью и содержанием раствора, показали, что отношение модуля упругости  $E_{бп}$  изменяется от 1,08 до 1,7 при среднем значении 1,54, Г. В. Марчюкайтиса [53], — от 1,64 до 2,18 при среднем значении 1,86. По-видимому, превышение отношения модулей получено из-за различных методов отверждения мономера в теле бетона. Опытами Гидропроекта и МИИТа [69, 76] было показано, что при радиационном отверждении мономера прочность на сжатие и модуль упругости увеличиваются примерно на 20%.

В опытах Т. И. Татишвили [94] для радиационно модифицированного бетонополимера получен модуль упругости  $E_{пб} = 5,3 \cdot 10^4$  МПа.

М. Р. Никонова, Р. Л. Серых и В. М. Джабарова [71, 89] для бетонов-матриц низкой прочности ( $R=30$  МПа)  $E_{бп}/E_б=1,88$ , высокой ( $R=70$  МПа)  $E_{бп}/E_б=1,28$ , т. е. наблюдалось уменьшение значения соотношения модулей с увеличением марки бетона и соответственно их модуль упругости уменьшается.

Опыты В. А. Беликова [76], проведенные с частично пропитанными бетонополимерами, показали, что величина  $E_{бп}/E_б$  варьирует от 1,2 до 1,7. Таким образом, довольно четкой зависимости модуля упругости бетонополимера от прочности не наблюдается. В связи с этим нами предложена эмпирическая формула, полученная на основе статистической обработки довольно большого числа экспериментальных результатов:

$$E_{бп} = 3,35 \cdot 10^4 + 0,383 E_б, \quad (6.18)$$

где  $E_б$  и  $E_{бп}$  выражаются в МПа.

Формула довольно хорошо описывает значения модулей упругости бетонополимеров при коэффициенте заполнения полиме-

ром сечения бетона-матрицы равно или более  $\mu = \frac{F_p}{F_a} \geq 0,8$ . Деформации бетонополимеров при кратковременном действии сжимающей нагрузки определяли на призмах сечением  $7 \times 7$  см и длиной 28 см. Рассматривали также характер развития деформаций образцов в зависимости от способа бетонирования бетона-матрицы.

Установлено, что между напряжениями и деформациями бетонополимерных образцов существует практически линейная зави-

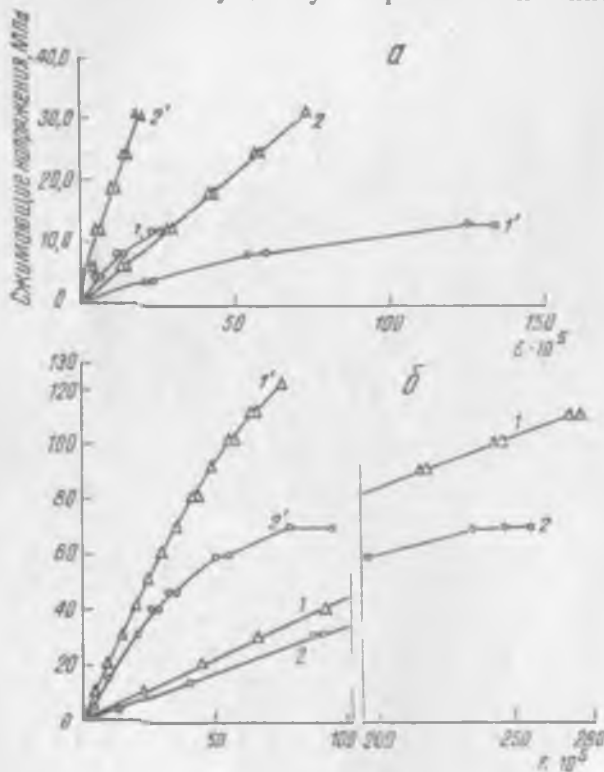


Рис. 6.1. Зависимость  $\sigma-\epsilon$  для бетона горизонтального бетонирования:

а—серия А-1: 1, 1'—продольные и поперечные деформации непитанного бетона; 2, 2'—то же, для питанного; б—серия А-3: 1, 1'—поперечные деформации бетонополимера; 2, 2'—то же, для исходного тяжелого бетона.

симость вплоть до разрушения. Это подтвердили и результаты опытов Г. В. Марчукайтиса [29, 53].

На рис. 6.1 и 6.2 отражена зависимость  $\sigma-\epsilon$  для бетона серий А-1 и А-3 горизонтального бетонирования. Как видно, почти в начале нагружения отмечается криволинейная зависимость  $\sigma-\epsilon$  в результате быстроснатекающих деформаций ползучести. У бетона серий А-1 она выражена ярче. В то же время кривая

деформирования бетонополимера при осевом сжатии практически прямолинейна, а деформации быстронатекающей ползучести проявляются в основном при напряжениях более  $0,75 R_{пр}$ .

Сравнение зависимостей между напряжениями и деформациями бетонополимерных элементов вертикального и горизонтального формования показывает, что пропитка бетона снижает степень анизотропии бетона-матрицы, вызванную способом формирования.

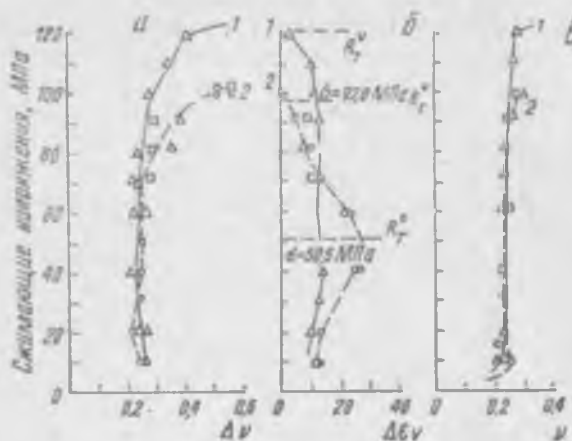


Рис. 6.2. Зависимость дифференциального коэффициента поперечной деформации  $\Delta\nu$  (а) и изменения объема бетона  $\Delta\varepsilon_v$  (б), а также коэффициента поперечной деформации  $\nu$  (в) бетонополимера серии А-3 от величины сжимающих напряжений.

Таким образом, можно говорить о снижении степени ортотропии бетона при его модификации полимером.

Продольные деформации быстронатекающей ползучести бетонополимера на различных ступенях нагрузки незначительны — около  $4\div 6\%$  полных продольных деформаций при кратковременных испытаниях до разрушения. Предельные продольные и поперечные деформации бетонополимера примерно в 1,5 раза больше, чем исходного бетона-матрицы.

Опытные данные о предельных продольных и поперечных деформациях (в  $10^5$ ) образцов серий А-1, А-2, А-3, А-4 представлены ниже:

| Вид деформаций            | А-1   | А-2   | А-3   | А-4  |
|---------------------------|-------|-------|-------|------|
| Осевое сжатие             |       |       |       |      |
| продольные бетона         | 180,0 | 150,0 | 210,0 | —    |
| продольные бетонополимера | 257,0 | 252,0 | 310,0 | —    |
| поперечные бетона         | 42,0  | 53,0  | 45,5  | —    |
| поперечные бетонополимера | 54,6  | 56,0  | 79,1  | —    |
| Осевое растяжение         |       |       |       |      |
| продольные бетона         | —     | —     | —     | 7,06 |
| продольные бетонополимера | —     | —     | —     | 20,0 |
| поперечные бетона         | —     | —     | —     | 2,1  |
| поперечные бетонополимера | —     | —     | —     | —    |

Образцы серии А-4 представляли собой восьмерки сечением  $5 \times 5$  см с базой измерения 20 см.

Для оценки предельной сжимаемости бетонополимера  $\epsilon_{\delta n}$  Г. В. Марчюкайтис [53] предложил формулу, в которой  $\epsilon_{\delta}$  зависит от прочности, деформативности и структурных характеристик бетонополимера и бетона-матрицы:

$$\epsilon_{\delta n} = \epsilon_{\delta} \left( 1 + V_n \frac{R_{\text{пр. бп}}}{H} \frac{V_n}{V_{\text{пор}}} \right), \quad (6.19)$$

где  $\epsilon_{\delta}$  — предельная сжимаемость бетона-матрицы;  $V_n$ ,  $V_{\text{пор}}$  — относительные объемы соответственно полимера и пор в бетоне-матрице;  $R_{\text{пр. бп}}$  — призменная прочность бетонополимера, МПа.

Подсчет значений  $V_n$  и  $V_{\text{пор}}$  трудоемок. Р. Л. Серых предложил оценивать предельную сжимаемость бетонополимера в зависимости от объема полимера в бетоне-матрице и от призменной прочности бетонополимера, но при этом сохранить структуру (6.19).

Принимая объем полимера в бетоне-матрице  $V_n$  по (6.17), запишем выражение, описывающее предельную сжимаемость полностью пропитанного бетонополимера:

$$\epsilon_{\delta n} = \epsilon_{\delta} \left( 1 + \frac{M^2 \gamma_{\delta}}{\gamma_n} R_{\text{пр. бп}} m \right), \quad (6.20)$$

где  $m$  — коэффициент, определяемый в опыте.

Ниже приведены данные, полученные Г. В. Марчюкайтисом [52, 53], и результаты, подсчитанные по (6.20) при  $\gamma_{\delta} = 2,4$  и  $\gamma_n = 1,2$  т/м<sup>3</sup>. Средняя величина коэффициента  $m$ , по данным Г. В. Марчюкайтиса, равна 0,75 с отклонением  $\pm 8\%$ . Как видно, различие в опытных значениях  $\epsilon_{\delta n}$  и подсчитанных по (6.20) не превышает  $\pm 15\%$ .

| $M$ ,<br>кг/кг | $R_{\text{п.б.}}$ ,<br>МПа | $R_{\text{пр. бп.}}$ ,<br>МПа | $\epsilon_{\delta} \cdot 10^5$ | $\epsilon_{\delta n}^{\text{оп}} \cdot 10^5$ | $\epsilon_{\delta n}^T \cdot 10^5$<br>по форм.<br>(6.20) | $\frac{\epsilon_{\delta n}^T}{\epsilon_{\delta n}^{\text{оп}}}$ |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 0,037          | 41,3                       | 125,9                         | 210                            | 306                                          | 264,3                                                    | 0,86                                                            |
| 0,040          | 30,7                       | 127,2                         | 200                            | 306                                          | 261,4                                                    | 0,85                                                            |
| 0,047          | 25,3                       | 117,3                         | 215                            | 310                                          | 298,6                                                    | 0,96                                                            |
| 0,062          | 21,8                       | 104,2                         | 220                            | 315                                          | 352,2                                                    | 1,12                                                            |
| 0,051          | 21,8                       | 102,8                         | 200                            | 305                                          | 280                                                      | 0,92                                                            |
| 0,071          | 16,5                       | 103,0                         | 185                            | 320                                          | 329                                                      | 1,03                                                            |
| 0,056          | 17,0                       | 121,0                         | 200                            | 320                                          | 313                                                      | 0,98                                                            |
| 0,052          | 18,5                       | 129,5                         | 200                            | 315                                          | 305                                                      | 0,97                                                            |

Коэффициент поперечной деформации — одна из важных физико-механических характеристик твердых тел, а его величину на уровне кратковременно действующих напряжений, равном 0,3 от разрушающих, принято называть коэффициентом Пуассона. Опытное определение коэффициента поперечных деформаций проводи-



ли на призматических образцах  $7 \times 7 \times 28$  см из бетонополимера и бетона-матрицы. При обработке результатов опытов выявлено

следующее: дифференциальный  $\Delta \nu = \frac{\Delta \epsilon_{\text{гор}}}{\Delta \epsilon_{\text{пр}}}$ , обычный коэффициент поперечной деформации, а также дифференциальное изменение объема бетона при сжатии  $\Delta \theta = \Delta \epsilon_{\text{пр}} - 2\Delta \epsilon_{\text{поп}}$ . Величины  $\Delta \epsilon_{\text{поп}}$  и  $\Delta \epsilon_{\text{пр}}$  представляют собой приращения поперечных и продольных деформаций на каждой ступени увеличения сжимающей нагрузки. На рис. 6.2, б показаны графики изменения указанных выше величин для бетонополимера серии А-3. Аналогичные данные получены для бетонов серий А-1, А-2. Установлено, что коэффициент Пуассона, независимо от прочности бетонополимера, можно принять равным 0,24, что на 20% больше, чем бетонов-матриц. Отмечается хорошая стабильность коэффициента поперечной деформации практически во всем интервале увеличения напряжений.

При проектной марке бетонополимера по прочности на сжатие 800; 1000; 1200; 1400 начальный модуль упругости бетонополимера ( $\epsilon_{0\text{п}} = 10^{-2}$ , МПа) составляет соответственно 380; 420; 440 и 460.

Коэффициент линейной деформации бетонополимера  $\alpha_{0\text{п}}$ , при изменении температуры от минус 50°C до плюс 50°C принимается равным  $1,1 \cdot 10^{-5}$  град $^{-1}$ , модуль сдвига  $G$  — равным 0,4 от соответствующих значений  $\epsilon_{0\text{п}}$ .

## Глава 7. ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНОПОЛИМЕРА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЖАТИИ

### 7.1. Ползучесть бетонополимера и бетона-матрицы

В немногочисленных литературных источниках о ползучести бетонополимеров даются сведения в основном о радиационно-модифицированном бетонополимере (РМБП), который имеет более низкую ползучесть, чем бетон-матрица.

Опыты показывают, что при напряжении  $\sigma = 0,3 \div 0,6$  удельные относительные деформации ползучести к 220 сут. с начала загрузки практически одинаковы (рис. 7.1). Это указывает на то, что у бетонополимеров при длительном действии нагрузки существует линейная связь между напряжениями и деформациями. Мера ползучести РМБП в диапазоне напряжений  $(0,3 \div 0,6)$   $\sigma_{\text{пр. бп}}$  в 5—6 раз меньше меры ползучести высокопрочных непропитанных бетонов.

Опытами Т. И. Татишвили, З. Н. Цилосани [94], В. И. Скаптинского [75], Г. В. Марчюкайтиса [53] показано, что деформации ползучести бетонополимеров практически обратимы. Это обстоятельство существенно упрощает описание наследственных функций при решении прикладных задач для конструкций из бетонополимера. Особенность, на которую исследователи обращали внима-

ние при изучении бетонополимера, — развитие деформаций расширения на незагруженных образцах — можно объяснить релаксацией в теле бетонополимера. Выше было показано возникновение собственных напряжений и влияние на них ползучести полимера. Выявлено, что чем выше содержание полимера в бетоне-матрице, тем больше начальная усадка и собственно выше напряжения в компонентах бетонополимера, и тем больше последующее увеличение деформаций расширения незагружаемых образцов.

По данным В. И. Скатынского [75], относительная деформация расширения бетонополимера равна  $7-10 \cdot 10^{-5}$ , а Гидропроект им. С. А. Жука к 90 суткам —  $5 \cdot 10^{-5}$ .

В развитии деформаций ползучести бетонополимеров имеются свои особенности, которые рассматриваются в данной главе\*.

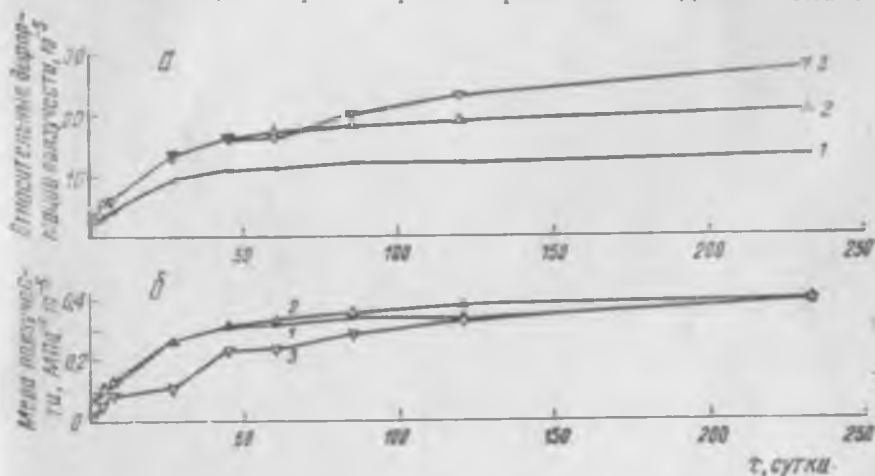


Рис. 7.1. Относительные деформации (а) и удельные деформации (б) ползучести рационально-модифицированного бетонополимера, загруженного до уровней напряжений  $\eta=0.3$  (1),  $\eta=0.45$  (2) и  $\eta=0.6$  (3) в долях от призмочной прочности.

При этом для большей наглядности приводятся данные о ползучести бетонополимера и бетона-матрицы.

На рис. 7.2 показаны кривые деформаций быстронатекающей ползучести для образцов бетона серий А-1 и А-3, различающихся прочностью как бетона-матрицы, так и бетонополимера. При рассмотрении этих кривых можно отметить различие как по характеру нарастания, так и по величине быстронатекающих деформаций у сравниваемых бетонов. У исходного бетона-матрицы наблюдается резкий подъем рассматриваемых кривых, у бетонополимера они более пологие.

Быстронатекающие деформации ползучести полностью пропитанного бетонополимера всегда меньше, чем в исходном бетоне-матрице примерно в 1,5—3 раза. Указанное обстоятельство прак-

\* Работа выполнена при участии д. т. н., проф. С. В. Александровского.

тически соблюдается как при одинаковых уровнях загрузки бетона полимера, так и одинаковых напряжениях в нем.

Экспериментальные исследования показали, что быстроснабжающие деформации ползучести бетонополимера по своей величине составляют 15 и 45% от величины деформаций медленно развивающейся ползучести. Первое значение относится к бетонополимерам, полученным на исходной бетонной матрице низкой

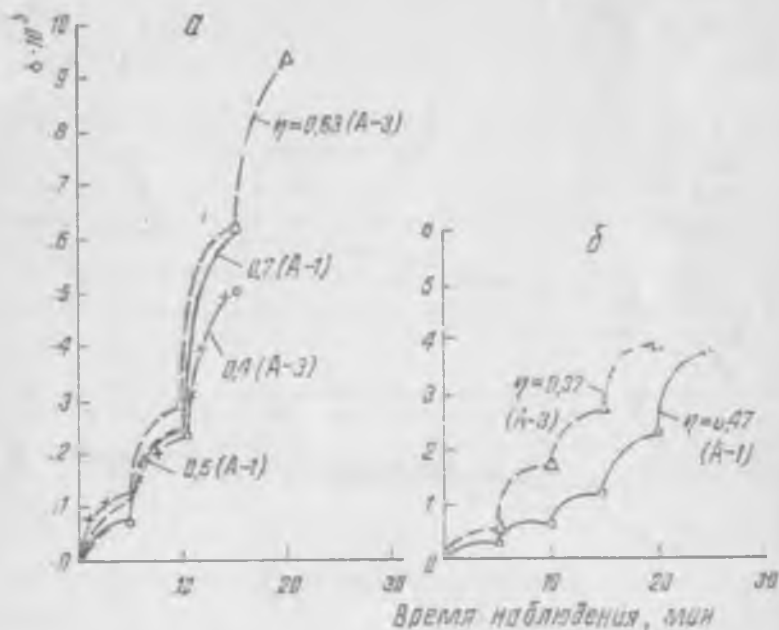


Рис. 7.2. Кривые относительных деформаций ползучести, натскающие за 5 мин при ступенчатом нагружении бетона-матрицы (а) и бетонополимера (б) до различных уровней напряжения сжатия (на графиках указаны уровни напряжений от призмочной прочности и серии образцов).

прочности (серия А-1), вторая — к бетонополимерам на основе высокопрочных бетонов-матриц (серия А-3).

Малые деформации быстроснабжающей ползучести бетонополимера объясняются тем, что модифицирование бетона-матрицы приводит к контракции матрица — мономер, объем исходной матрицы уменьшается, что обуславливает уменьшение открытых пор и залечивание дефектов, созданных во время твердения и высушивания бетона-матрицы. К тому же модифицирование проводится на практически сухой бетонной матрице, а длительные деформации высушенной матрицы весьма малы.

Медленно развивающаяся ползучесть бетонополимера изучалась на образцах серий А-1, А-2, А-3, различающихся призмочной прочностью бетона-матрицы, равной соответственно 14,9; 26,3 и 74,8 МПа. Бетонополимер, получаемый путем полной пропитки

## Деформации бетонов при длительном действии сжимающей нагрузки

| Серия образцов | Величина начальной нагрузки, в долях проектной прочности, % | Вид бетона | Относительные деформации $\epsilon \cdot 10^3$ |                     |                                                    |      |      |       |       |       |       |       | Характеристическая нагрузка $\sigma_{\text{хр}}$ (168) (МПа) | Мера ползучести $\epsilon_p$ (168), 10 <sup>-3</sup> МПа <sup>-1</sup> |
|----------------|-------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                             |            | при нагружении                                 |                     | после нагружения, выдержанные в течение t - 5, сут |      |      |       |       |       |       |       |                                                              |                                                                        |
|                |                                                             |            | тотальное                                      | быстр. форм. относ. | 1                                                  | 4    | 10   | 20    | 65    | 100   | 137   | 168   |                                                              |                                                                        |
|                |                                                             |            |                                                |                     |                                                    |      |      |       |       |       |       |       |                                                              |                                                                        |
| А-1            | 0,5                                                         | Б          | 35,9                                           | 2,37                | 6,7                                                | 14,3 | 24,9 | 39,3  | 57,6  | 65,6  | 70,7  | 72,4  | 2,07                                                         | 91,0                                                                   |
|                | 0,7                                                         | Б          | 53,6                                           | 6,39                | 17,5                                               | 32,9 | 51,0 | 72,8  | 109,1 | 115,0 | 119,9 | 122,2 | 2,4                                                          | 113,0                                                                  |
|                | 0,38                                                        | БП         | 81,0                                           | 2,84                | 5,2                                                | 7,0  | 11,8 | 14,8  | 17,8  | 18,6  | 18,4  | 18,6  | 0,255                                                        | 5,95                                                                   |
|                | 0,47                                                        | БП         | 109,0                                          | 3,75                | 6,7                                                | 9,5  | 12,8 | 16,2  | 20,7  | 21,7  | 21,1  | 21,9  | 0,226                                                        | 5,85                                                                   |
| А-2            | 0,52                                                        | Б          | 91,3                                           | 5,05                | 17,5                                               | 31,3 | 61,1 | 65,0  | 93,9  | 109,1 | 118,9 | 122,8 | 1,4                                                          | 33,8                                                                   |
|                | 0,63                                                        | Б          | 117,8                                          | 9,26                | 16,1                                               | 55,3 | 85,7 | 107,5 | 132,2 | 177,6 | 194,6 | 201,4 | 1,7                                                          | 43,2                                                                   |
|                | 0,37                                                        | БП         | 94,8                                           | 2,87                | 0,73                                               | 1,6  | 3,3  | 4,4   | 5,4   | 5,1   | 5,2   | 6,4   | 0,008                                                        | 2,2                                                                    |
|                |                                                             |            |                                                | 4,55                | 4,2                                                | 6,0  | 8,5  | 10,2  | 12,6  | 13,7  | 14,3  | 14,6  | 0,2                                                          | 3,96                                                                   |
| А-2            | 0,5                                                         | Б          | 62,9                                           | 5,8                 | 7,5                                                | 14,1 | 20,4 | 26,8  | 43,0  | 49,4  | 58,3  | —     | 1,02                                                         | 44,2                                                                   |
|                | 0,7                                                         | Б          | 103,1                                          | 10,0                | 12,9                                               | 27,0 | 34,2 | 45,4  | 72,8  | 83,5  | 98,4  | —     | 1,05                                                         | 52,2                                                                   |
|                | 0,4                                                         | БП         | 92,2                                           | 2,58                | 3,6                                                | 6,8  | 8,5  | 10,8  | 14,5  | 16,6  | 16,9  | —     | 0,211                                                        | 4,2                                                                    |

исходной матрицы мономером ММА и отвержденного термочувствительным методом, имел среднюю призмную прочность соответственно равную 101,3; 119,7 и 132,5 МПа.

Образцы призм  $7 \times 7 \times 60$  см загружали в пружинных установках усилием 30 т до уровней напряжений в долях от призмной прочности равных  $\eta=0,5$  и  $0,7$  для бетона-матрицы и  $\eta=0,4$  для бетонополимера в возрасте 60 сут с момента их изготовления. Методика проведения исследований соответствовала рекомендациям НИИЖБ [83].

В табл. 7.1 приведены опытные данные о деформациях исследованных бетонов при длительном действии сжимающей нагрузки. На части образцов серии А-3 была осуществлена частичная про-

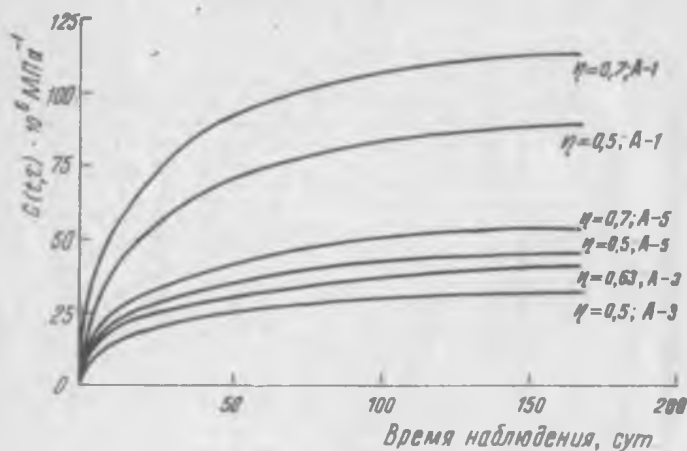


Рис. 7.3 Кривые удельных относительных деформаций ползучести бетона матрицы серий А-1, А-2, А-3, загруженных при уровнях напряжений  $\eta=0,5 \div 0,7$ .

питка на различную глубину, образцы матрицы серии А-2 прошли термообработку при изготовлении.

На рис. 7.3 показаны осредненные по трем образцам кривые удельных относительных деформаций ползучести бетона-матрицы. Отклонения от средней кривой по отдельным образцам-близнецам не превышали в опыте 8%.

На рис. 7.4 показаны осредненные по шести образцам кривые  $\epsilon(t-\tau)$  бетонополимера, загруженные до уровня  $\eta=0,4$ . Отклонения от средней кривой на отдельных образцах-близнецах не превышали в опыте 6%.

Как видно, при одном уровне загрузки  $\eta=0,4-0,5$  меры ползучести бетонополимера, как и меры ползучести бетона-матрицы, зависят от их соответствующей прочности. Анализ кривых удельных деформаций ползучести показывает, что имеет место существенное различие как в их величинах, так и в скоростях их развития у бетонополимеров и бетонов-матриц. Мера ползучести бетона-

матрицы в 10—15 раз выше, чем мера ползучести бетонополимера. Затухание деформаций ползучести у бетонополимера наступает значительно быстрее, чем у бетона-матрицы. Практически к 50 суткам наблюдения за ползучестью бетонополимера достигается предельная его величина.

Сравнение значений полных относительных деформаций при длительном сжатии показывает, что они у бетона-матрицы в момент окончания эксперимента в 1,6—3,1 раза выше соответствующих деформаций бетонополимера, соответственно, при примерно

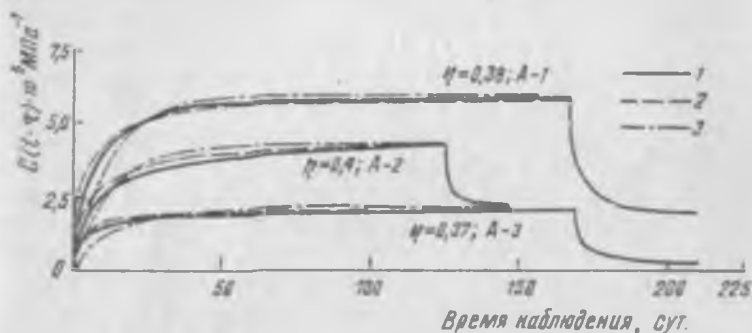


Рис. 7.4. Кривые удельных относительных деформаций и упругого последствия ползучести бетонополимера серий А-1, А-2, и А-3:

1 — аппроксимация по формуле (7.1); 2 — по формуле (7.2).

одинаковых уровнях напряжений и примерно равновеликих значениях напряжений (образцы серии А-3).

Показанные на рис. 7.4 кривые последствия свидетельствуют о значительной обратимости деформаций ползучести. Величина обратимой части деформаций ползучести на первые сутки после разгрузки бетонополимера составляет примерно 40% от предельной величины деформаций ползучести. В дальнейшем процесс упругости последствия затухает и на 50-е сутки после разгрузки обратимая часть деформаций ползучести составляет 60—90% от предельной.

Таким образом, по своим свойствам бетонополимеры могут быть практически отнесены к наследственно-упругим средам и для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций из них может быть с успехом использована теория упругой наследственности.

Аппроксимация меры ползучести полностью пропитанного бетонополимера как нестареющей наследственной среды может осуществляться по формулам [1]:

$$C_{6n}(t - \tau) = \psi_0 [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}] + \Delta_0 [1 - e^{-\alpha(t-\tau)}] \quad (7.1)$$

или, что менее точно,

$$C_{6n}(t - \tau) = C_{6n}(\infty) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}], \quad (7.2)$$

где  $\psi_0 + \Delta_0 = C_{an}(\infty)$ , кроме того для бетонополимера можно принять  $\Delta_0 = 0,223C_{сб}(\infty)$ ;  $\psi_0 = 0,778C_{оп}(\infty)$ ;  $\Delta_0$  — мера быстропротекающей деформации ползучести;  $\psi_0$  — мера медленно развивающейся деформации ползучести.

Значения коэффициентов в формулах (7.1) и (7.2) получены равными

$$\gamma = 0,045 \text{ сут}^{-1}; \alpha = 5 \text{ сут}^{-1}; \gamma_1 = 0,06 \text{ сут}^{-1}.$$

Как видно из рис. 7.4, наилучшим образом аппроксимация осуществляется по формуле (7.1). Аппроксимация меры ползучести бетона-полимера по формуле (7.2) дает отклонение от экспериментальных кривых на начальных участках.

Большое число экспериментальных исследований посвящено изучению прочностных и деформативных свойств бетонополимерных образцов, пропитанных по всему сечению. При этом один из размеров поперечного сечения пропитанного элемента обычно не превышал 10 см, так как его увеличение влечет за собой неполную пропитку и приводит к существенному разбросу результатов опыта. Учитывая, что в практике строительства применяют конструкцию с сечениями больших размеров, следует думать, что при применении бетонополимера как конструктивного материала предпочтение будет отдано частично пропитанным элементам.

В основном частичной пропитке должна подвергаться сжатая зона изгибаемых и внецентренно сжатых элементов, растянутые элементы, в которых можно увеличить сопротивление на растяжение вдвое и, наконец, элементы конструкций, работающие в агрессивной среде.

Частично пропитанные сечения конструктивных элементов обладают рядом особенностей, связанных с образованием ярко выраженной неоднородной структурой бетонополимера. Методы расчета таких сечений довольно сложны и по сути дела никаких прямых экспериментальных исследований в этом направлении не проводилось. Накопление результатов таких исследований позволит в первом приближении оценить расчетные схемы таких систем и разработать практические методы их расчета.

В частично пропитанных сечениях из-за усадочных явлений полимера, развивающихся при его отверждении, возникает довольно сложное внутреннее напряженно-деформированное состояние, которое следует учитывать в последующих расчетах [36, 94]. Теоретический подсчет возникающих при этом напряжений показывает, что в полностью пропитанных бетонополимерах сжимающие напряжения в бетоне-матрице достигают 12—16 МПа и довольно быстро релаксируют за счет ползучести полимера, снижаясь до 8,0—10 МПа. Протекание релаксационных процессов подтверждается тем, что после пропитки бетона-матрицы полученный бетонополимер с течением времени увеличивается в размерах.

В случае ограничения технологических усадочных деформаций с помощью арматуры указанные внутренние напряжения пе-

пераспределяются и в бетоне-матрице возникают растягивающие напряжения, достигающие 2—3 МПа.

Если же рассматривать частично пропитанный бетон, то ограничителем деформаций будет являться непропитанное ядро бетона-матрицы, в котором начнут развиваться сжимающие напряжения и оно окажется обжатым как бы кольцевой обоймой. Наличие арматуры в такой системе приведет к еще более сложному характеру распределения напряжений. Изменение внутреннего напряженно-деформированного состояния такой системы будет определяться ползучестью полимера в первую очередь и ползучестью непропитанного ядра бетона-матрицы.

Изучение ползучести полностью пропитанного бетонополимера показало, что его деформации ползучести при осевом сжатии в несколько раз меньше, чем в исходной бетонной матрице [8, 75, 76]. Это вызвано тем, что его ползучесть, по-видимому, в основном определяется упругим уплотнением местных дефектов структуры, образовавшихся при высушивании и дальнейшей полимеризации мономера.

Упругое уплотнение бетонополимера подтверждено изучением процесса упругого последействия, при котором все деформации ползучести оказались полностью обратимыми.

Процесс ползучести бетонополимера с частичной поверхностной пропиткой изучался на бетоне-матрице с прочностью на осевое сжатие 88 МПа. Пропитка бетона-матрицы производилась полимером метилметакрилатом и последующим термokatалитическим отверждением. Прочность полностью пропитанного бетонополимера получалась равной 146,3 МПа с коэффициентом вариации  $C = 10,3\%$ .

Частичная же пропитка образцов-близнецов была осуществлена на различную глубину при размере поперечного сечения образца равном  $7 \times 7$  см. Ниже приведены основные данные о глубине пропитки  $\delta$  и относительной площади пропитки  $F_n/F_0$  образцов, удельная деформация ползучести  $C_{6п}$  и прочности бетонополимера на осевое сжатие  $R_{пр. 6п}$ :

| $\delta$ , см | $F_n/F_0$ | $C_{6п} \cdot 10^6$ , (МПа) $^{-1}$ | $R_{пр. 6п}$ , МПа | $\frac{C_{6п}}{C_{обп}}$ |
|---------------|-----------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 3,5           | 1 0       | 1,66                                | 146,3              | 1                        |
| 3,2           | 0,99      | 2,25                                | 143,0              | 1,35                     |
| 2,5           | 0,91      | 2,66                                | 132,0              | 1,60                     |
| 2,0           | 0,82      | 3,43                                | 128,5              | 2,07                     |
| 1,3           | 0,6       | 4,86                                | 115,0              | 2,93                     |
| 1,0           | 0 4)      | 5,31                                | 104,0              | 3,20                     |

$C_{6п}$  — мера ползучести полностью пропитанного бетонополимера.

Данные указывают на снижение прочности бетонополимера на 29% и увеличение его ползучести более чем в три раза при уменьшении площади пропитанного сечения до 50%. Дальнейшее сокращение площади пропитанного сечения, по-видимому, будет



уменьшение прочности из-за неполной пропитки составит 12—15%, а увеличение ползучести по отношению к полностью пропитанному в 2 раза. Что касается физико-механических свойств,

то модуль упругости при кратковременном нагружении возрастает на 10—15%, поэтому для области  $\mu \geq 0,7$  остается справедливой формула (7.4).

Более точная оценка меры ползучести бетонополимера с частичной пропиткой при высушенном ядре производится введением функции  $f(\mu)$ , полученной на основе экспериментальных результатов и имеющей вид

$$f(\mu) = 5,24 - 4,25\mu. \quad (7.5)$$

Коэффициент корреляции на участке изменения  $\mu \geq 0,5$  равен

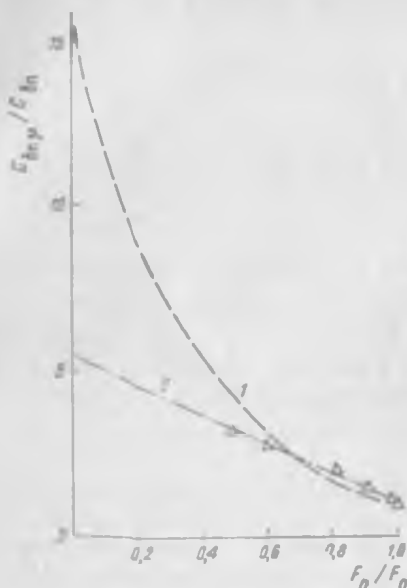


Рис. 7.6. Зависимость ползучести бетонополимера от относительной площади пропитанного сечения.

$r=0,97$ , что указывает на высокую тесноту связи между  $C_{бп}$  и  $\mu$ .

Общее выражение меры ползучести при частично пропитанной матрице можно представить в форме

$$C_{бп} = K_c C_б f(\mu). \quad (7.6)$$

Кривая 1 на рис. 7.6 показывает предлагаемое нарастание меры ползучести частично пропитанного бетона при неполноте высушенном ядре. Эта кривая в определенной степени является гипотетической и оправданием для ее построения может служить отсутствие каких-либо экспериментальных данных.

Для аппроксимации этой кривой применена экспоненциальная зависимость вида

$$f(\mu) = \frac{1}{K_c} e^{-\gamma \mu}, \quad (7.7)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, отражающий предельные условия для деформаций ползучести бетонополимера.

Значение коэффициента  $\gamma$  получено из условия, что при  $\mu=1$   $C_{бп}=C_б$ , при  $\mu=1$   $C_{бп}=K_c C_б$ . Принимая во внимание, что коэффициент  $K_c$  равен 0,0655, значение коэффициента  $\gamma$  получено равным 2,73. После подстановки функции  $f(\mu)$  в формулу (4.6) получим основное выражение для подсчета ползучести частично про-

питанного бетонополимера с невысушенным ядром при любом известном  $\mu$ :

$$C_{\text{ан}} = C_0 e^{-2.73\mu}, \quad (7.8)$$

При расчете предварительно напряженных элементов при натяжении арматуры на бетон следует учитывать потери предварительного напряжения арматуры согласно указаниям главы СНиП II-21-75. При этом:

а) потери от усадки и первые потери от ползучести принимаются равными нулю;

б) вторые потери от ползучести следует определять по формуле

$$\sigma_{\text{п}} = 80 \sigma_{\text{бп}} / R_0 \text{ МПа при } \sigma_{\text{бп}} / R_0 \leq 0,7,$$

где  $R_0$  — передаточная прочность бетонополимера, принимаемая равной 75% проектной марки;

$\sigma_{\text{бп}}$  — напряжения в бетонополимере в сечениях, нормальных к произвольной оси элемента, определяемые в соответствии с указаниями главы СНиП II-21-75; в стадии предварительного обжатия  $\sigma_{\text{бп}}$  не должны превышать 65% передаточной прочности бетонополимера  $R_0$ .

Расчетные сопротивления арматуры сжатию  $R_{\text{ас}}$ , используемые при расчете конструкций по предельным состояниям первой группы, при наличии сцепления арматуры с бетонополимером принимаются равными соответствующим расчетным сопротивлениям арматуры растяжению  $R_{\text{а}}$ , но не более 600 МПа.

### 7.3. Релаксация напряжений в бетонополимерах

Для применения бетонополимера в качестве конструкционного материала в несущих элементах зданий и сооружений, подвергающихся изменениям температуры окружающей среды и иным переменным или постоянным вынужденным деформациям, важно знать поведение материала в этих условиях. Оценка пластических свойств материала обычно осуществляется по кривой релаксации вынужденных напряжений или усилий.

Уже было показано, что бетонополимер можно представить как нестареющую наследственно упругую среду, подчиняющуюся определенным закономерностям теории упругости наследственности.

Используя формулу (7.1) и ее решение, полученное С. В. Александровским [1] для нестареющего материала со свойствами инвариантными во времени, подсчитали значения коэффициента приведения  $H^*(t - \tau)$  по формуле

$$H^*(t - \tau) = 1 - \frac{A_1}{p_1} [1 - e^{-p_1(t-\tau)}] - \frac{A_2}{p_2} [1 - e^{-p_2(t-\tau)}] \quad (7.9)$$

при исходных средних значениях для полностью пропитанного бетонополимера и бетона-матрицы:

$$E_{оп} = 4,51 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_6 = 1,85 \cdot 10^4 \text{ МПа (серия А-1);}$$

$$E_6 = 3,76 \cdot 10^4 \text{ МПа (серия А-3).}$$

Ниже приведены значения коэффициентов, входящих в формулу (7.9), и меры ползучести  $C(\infty)$ :

| Прочность при сжатии, МПа | Вид бетона | $A_1$ | $A_2$ | $\rho_1$ | $\rho_2$ | Мера ползучести $C \cdot 10^6, \text{ МПа}^{-1}$ |
|---------------------------|------------|-------|-------|----------|----------|--------------------------------------------------|
| 100                       | БП         | 0.404 | 0.005 | 3.403    | 0.050    | 5.96                                             |
| 120                       | БП         | 0.292 | 0.004 | 3.291    | 0.049    | 4.30                                             |
| 140                       | БП         | 0.162 | 0.002 | 3.162    | 0.047    | 2.10                                             |
| 30                        | Б          | 1.654 | 0.009 | 6.65     | 0.025    | 89.0                                             |
| 70                        | Б          | 1.226 | 0.008 | 6.22     | 0.022    | 33.0                                             |

На рис. 7.7 показаны кривые релаксации, построенные по формуле (7.9), из которых видно, что характер кривых для бетонополимера (1, 2, 3) и бетонов-матриц (4, 5) совершенно разли-

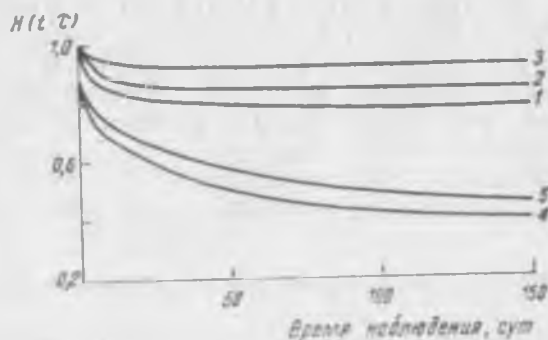


Рис. 7.7. Характеристика деформации релаксации бетонополимера.

чен. Кривые релаксации бетонополимера значительно быстрее затухают, в то время как у бетона-матрицы они положе и наблюдаемое затухание наступает на 150-е сутки. Степень релаксации у бетонополимеров значительно ниже, чем у бетона-матрицы. Предельная степень релаксации напряжений у бетонополимеров на время, равное бесконечности, соответственно по номерам на кривых рис. 7.7 равна 23, 17, 9. У бетонов-матриц степень релаксации напряжений довольно значительна и составляет 61 и 56%.

Значения коэффициентов  $H^*(t-\tau)$  зависят от прочности бетонополимера, причем их разность, приходящаяся на единицу прочности, существенно больше, чем у бетонов-матрицы.

В практике расчета конструкций на вынужденные деформации обычно пользуются широко известной формулой вида

$$\sigma^*(t - \tau) = \bar{\sigma}(t)H^*(t - \tau), \quad (7.10)$$

где  $\sigma^*(t - \tau)$  — величина полных напряжений в бетоне с учетом его ползучести;

$\bar{\sigma}(t)$  — упруго-мгновенные напряжения, определяемые методами теории упругости;

$H^*(t - \tau)$  — коэффициент приращения упругих напряжений к искомому полному напряжению, отыскиваемому с учетом ползучести.

В отношении бетонополимеров с частичной пропиткой этот вопрос пока неясен, так как существенно неоднородная композиционная структура обладает различными реологическими свойствами.

Дальнейшие исследования в изучении деформативных свойств частично пропитанных полимером бетонов следует продолжать с тем, чтобы выявить скрытые возможности и интересные для науки и практики явления, протекающие в бетонополимерах.

## Глава 8. СТРУКТУРА И СТОЙКОСТЬ БЕТОНОПОЛИМЕРОВ

### 8.1. Пористость и проницаемость

Заполнение порового пространства бетонов полимерами — эффективный метод уменьшения пористости и соответственно проницаемости бетона.

Установлено, что при пропитке бетона мономером с последующим отверждением полимерный каркас образуется не во всем поровом пространстве [10, 49, 111]. Остаются незаполненными воздушные поры размером более 15 мкм. Визуальные и микроскопические наблюдения показали, что воздушные поры лишь частично заполняются полимером.

Микропоры размером менее 1 мкм заполняются полимером вследствие действия при пропитке бетона мономером капиллярных сил. Так как после заполнения микропор силы капиллярного всасывания перестают действовать, то начинается заполнение более крупных воздушных пор.

Нами была определена общая, закрытая, условно закрытая и кажущаяся закрытая пористость для бетонополимеров на основе бетона серий А-1, А-2, А-3.

Как видно из данных табл. 8.1, пропитка бетона мономером существенно снижает общую пористость материала по сравнению с исходным бетоном-матрицей. С уменьшением В/Ц исходной бетоно-матрицы соответственно уменьшается общая пористость. Анализ данных водопоглощения и водонасыщения материала указывает на то, что после модифицирования бетона полимером он становится практически непроницаемым для воды. Этим объясняется и высокая водостойкость бетонополимера (табл. 8.2).

Помимо воздушных пор, при пропитке бетона полимером остаются незаполненными и наиболее мелкие микропоры размером около 50 Å и меньше [111]. Согласно закону Фика, они могут способствовать диффузионному переносу агрессивных жидкостей. Об-

Таблица 8.1

Структурные характеристики бетонополимера (БП) и бетона-матрицы (Б)

| Серия бетона | В/Ц  | Вид бетона | Содержание полимера по массе, % | Волопоглощение 24 ч, % | Водопоглощение 12 м.с., % | Общая пористость, % | Пористость           |                              |                                |
|--------------|------|------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------|
|              |      |            |                                 |                        |                           |                     | закрытая (гр.7-гр.6) | условно закрытая (гр.6-гр.5) | кажущаяся закрытая (гр.9-гр.8) |
| А-1          | 0,55 | БП         | 5,04                            | 3,39                   | 0,95                      | 1,82                | 0,87                 | 0,56                         | 0,39                           |
|              |      | Б          | —                               | 4,95                   | 7,12                      | 12,11               | 4,99                 | 2,17                         | 4,95                           |
| А-3          | 0,35 | БП         | 3,95                            | 0,28                   | 0,81                      | 1,36                | 0,55                 | 0,53                         | 0,28                           |
|              |      | Б          | —                               | 3,69                   | 5,08                      | 9,81                | 4,73                 | 1,39                         | 3,69                           |
| А-2          | 0,68 | БП         | 5,60                            | 0,69                   | 1,67                      | 2,35                | 0,68                 | 0,98                         | 0,69                           |
|              |      | Б          | —                               | 5,66                   | 8,21                      | 14,67               | 6,46                 | 2,55                         | 5,66                           |

известно, что если скорость изменения концентрации агрессивной среды во времени  $dc/dt$  равна нулю, а величина скорости

Таблица 8.2

Водостойкость бетона-матрицы и бетонополимера

| Серия | Вид бетона | Коэффициент водостойкости |         |                          |         |
|-------|------------|---------------------------|---------|--------------------------|---------|
|       |            | на сжатие                 |         | на растяжение при изгибе |         |
|       |            | 180 сут                   | 360 сут | 180 сут                  | 360 сут |
| А-1   | БП         | 0,98                      | 0,97    | 0,97                     | 0,95    |
|       | Б          | 0,83                      | 0,78    | 0,83                     | 0,71    |
| А-3   | БП         | 0,99                      | 0,98    | 0,96                     | 0,95    |
|       | Б          | 0,89                      | 0,86    | 0,82                     | 0,80    |
| А-2   | БП         | 0,98                      | 0,96    | 0,96                     | 0,94    |
|       | Б          | 0,82                      | 0,74    | 0,82                     | 0,71    |

проникновения  $j$  постоянна, то процесс диффузионной проницаемости подчиняется первому закону Фика

$$j = -D \frac{dc}{dx}, \quad (8.1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии.

Обозначив через  $h$  толщину стенки образца, считая  $D$  постоянным и интегрируя уравнение (8.1) в пределах  $c_1 - c_2$ , получим:

$$j \int_{x=0}^{x=h} dx = -D \int_{c_1}^{c_2} dc, \quad (8.2)$$

Откуда

$$j = \frac{D(c_2 - c_1)}{h}. \quad (8.3)$$

Если выполняется закон Генри, то

$$c = sp, \quad (8.4)$$

где  $s$  — коэффициент растворимости диффундирующего вещества в материале;  $p$  — давление пара.

С учетом (8.4) уравнение (8.3) можно переписать в виде

$$j = \frac{Ds(p_2 - p_1)}{h}, \quad (8.5)$$

или

$$Ds = \frac{jh}{p_2 - p_1}. \quad (8.6)$$

Выражение  $K = Ds$  представляет собой постоянную проницаемости.

Проведенные испытания позволили после установления стационарного процесса диффузии водяного пара определить постоянную проницаемость —  $K = 1,44 \cdot 10^{-5}$  г/см · ч · мм рт. ст.

Определив коэффициент проницаемости, рассчитываем по (8.5) скорость проникновения влаги через бетонополимер  $7,6 \cdot 10^{-5}$  г/ч · см<sup>2</sup>.

Коэффициент проницаемости  $K$  для бетонополимера, определенный в опытах автора, значительно выше, чем для полиметилметакрилата равного  $3,6 \cdot 10^{-8}$  г/см · ч · мм рт. ст. В то же время постоянная влагопроницаемости для бетонополимера на порядок ниже, чем у обычного цементного бетона. По данным Р. Е. Бриллинга [16], для мелкозернистого бетона состава Ц:П=1:3 величина  $K$  составила  $3,8 \cdot 10^{-5}$  г/см · ч · мм рт. ст., а по данным В. Джаббарова [21] —  $4,1 \cdot 10^{-5}$ .

Как и следовало ожидать, коэффициент проницаемости бетонополимера занимает промежуточное значение между коэффициентами для полимера и бетона. Заполнение поровой структуры бетона полимером в 2,5—3 раза снижает коэффициент проницаемости.

Таким образом, пропитка бетона полимером, колыматирует поровое пространство и препятствует проникновению в него агрессивных сред, повышая тем самым срок службы конструкций из бетонополимеров.

## 8. 2. Поведение бетонополимеров в агрессивных солевых средах

В республиках Средней Азии грунты сильно минерализованы такими солями, как  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  и другими. Известно, что коррозия бетонов в засоленном грунте возможна только при наличии в нем влаги. В районах с сухим жарким климатом при частом повторении циклов увлажнения и высушивания условия службы бетонных изделий и конструкций наиболее жестки. Результаты фундаментальных исследований солестойкости бетонных и железобетонных конструкций, описанные В. М. Москвиным, М. А. Мощанским, А. Минасом, Ф. М. Ивановым, И. С. Канцельпольским и др. исследователями, показывают, что именно коррозия третьего вида, развивающаяся с течением времени в бетоне, вызывает его быстрое разрушение.

Проблема повышения долговечности бетона в агрессивных солевых средах наравне с задачами повышения его физико-механических показателей и привела к созданию нового композиционного материала. В некоторых литературных источниках [75, 111] бетонополимер характеризуется как материал с высокой сопротивляемостью к действию агрессивных солей.

Для дальнейшего изучения солестойкости авторами проводились испытания бетонополимера в 10%-ном растворе и 20%-ном растворе  $\text{KCl}$  с периодическим насыщением и высушиванием образцов. Выбор этих солей обусловлен тем, что они содержатся в значительных количествах в грунтовых водах большинства районов Средней Азии, а также в водах, предназначенных для опреснения в челноопреснительных камерах из бетонополимера.

Принятая в опытах концентрация солей согласно СН 262-67 оценивается как сильноагрессивная даже для особо плотного бетона на сульфатостойком портландцементе. При такой концентрации в бетоне могут развиваться процессы сульфатоалюминатной и гипсовой коррозии с образованием в твердой фазе кристаллов гидросульфатоалюмината кальция и сернокислого кальция. Режим увлажнение — высушивание весьма жесткий в связи с тем, что за счет быстрого накопления кристаллов в порах бетона и их роста возникает кристаллизационное давление, соизмеримое с пределом прочности бетона на разрыв и даже превосходящее его.

Основной критерий при оценке солестойкости бетонополимера — показатель изменения прочности, поскольку он выражает связь физико-химических и механических свойств материала, а также в связи с тем, что прочность является основным показателем при определении работы конструкций в эксплуатационных условиях. Накопление кристаллогидрата солей в структуре бетонополимера характеризуется приращением его массы.

Испытания бетонополимерных образцов размером  $4 \times 4 \times 16$  см в растворах указанных солей позволили проследить изменение коэффициента солестойкости  $K_c = R/R_0$ .

Из данных табл. 8.3 видно, что в условиях жестких испытаний бетонополимеров в течение двух лет средний прирост массы за счет накопления кристаллогидратов солей составил 1,5—2%, в то время как коэффициент стойкости ( $K_{ст}$ ) снизился на 15—18%. Используемые непропитанные бетонные образцы той же серии в

Таблица 8.3

**Стойкость бетонополимеров (серия образца А-1)  
в агрессивных средах**

| Агрессивная среда                   | Изменение массы (% , числитель) и коэффициент стойкости $K_{ст}$<br>(знаменатель) в течение двух лет, месяц |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                     | 1                                                                                                           | 3                   | 6                   | 9                   | 12                  | 15                  | 18                  | 21                  | 24                  |
| 20% KCl                             | $\frac{0.15}{0.97}$                                                                                         | $\frac{0.41}{0.90}$ | $\frac{0.58}{0.88}$ | $\frac{0.81}{0.86}$ | $\frac{0.95}{0.85}$ | $\frac{1.89}{0.83}$ | $\frac{1.76}{0.82}$ | $\frac{1.77}{0.82}$ | $\frac{1.78}{0.82}$ |
| 10% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | $\frac{0.19}{0.99}$                                                                                         | $\frac{0.29}{0.97}$ | $\frac{0.40}{0.96}$ | $\frac{0.61}{0.93}$ | $\frac{0.79}{0.91}$ | $\frac{0.99}{0.87}$ | $\frac{1.43}{0.86}$ | $\frac{1.45}{0.86}$ | $\frac{1.48}{0.85}$ |

качестве контрольных через 1,5—2 мес. испытаний разрушились с изменением массы на 25—28%.

Таблица 8.4

**Химический состав воды подземной скважины на территории  
Бахардинского района Туркменской ССР**

| Ед. изм. | Cl    | SO <sub>4</sub> | HCO <sub>3</sub> | Na+K  | Ca   | Mg   | $\frac{Na+Mg}{Cl}$ | $\frac{SO_4 \cdot 100}{Cl}$ |
|----------|-------|-----------------|------------------|-------|------|------|--------------------|-----------------------------|
| Мг./л    | 20640 | 120             | 310              | 11410 | 1370 | 290  | —                  | 0,58                        |
| Мг.-экв. | 582   | 2,5             | 5                | 496   | 68   | 24,5 | 0.89               | 0,43                        |
| %        | 98,8  | 0.4             | 0.8              | 84.2  | 11.6 | 4.2  | —                  | 0,4                         |

Помимо лабораторных испытаний были проведены исследования стойкости бетонополимера в сильно минерализованной воде одной из подземных скважин на территории Бахардинского района Туркменской ССР. Химический состав этой воды, предназначенной для опреснения в бетонополимерных лотках теплоопреснителей, приведен в табл. 8.4.

Как видно из табл. 8.4, вода из-под скважины, предназначенной для опреснения, богата хлористым и сернокислыми солями, которые наиболее опасны для развития солевой формы физической коррозии бетона.

Испытания бетонополимерных и бетонных образцов проводили в натурных условиях. С этой целью образцы помещали на длительные сроки в действующие лотки солнечных опреснителей,



изготовленных из обычного бетона. Температура минерализованной воды в челноопреснителе может достигать 75—80°C.

Результаты натурных испытаний стойкости бетонополимера (бетон серии А-1) в условиях воздействия засоленной воды приводятся ниже:

| Показатель                | Продолжительность натурных испытаний, сут. |      |      |
|---------------------------|--------------------------------------------|------|------|
|                           | 30                                         | 90   | 180  |
| Изменение массы, %        | 0,21                                       | 0,57 | 0,72 |
| Коэффициент солестойкости | 0,99                                       | 0,98 | 0,98 |

Как видно, в течение 180 суток испытаний предел прочности бетонополимера (серия образца А-1) при изгибе, выраженный через коэффициент солестойкости  $K_c$ , практически не изменился а привес массы составил 0,72%. Следовательно, на основании результатов лабораторных и натурных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Небольшая продолжительность испытаний не позволяет в полной мере характеризовать коррозионную солестойкость бетонополимера, однако сравнительные испытания стойкости непропитанного бетона и бетонополимера свидетельствуют о значительно более высокой сопротивляемости бетонов воздействию солевой агрессии.

2. Причинами повышения стойкости бетонов после пропитки их полимерами можно считать общее снижение среднего эффективного радиуса пор [40] и уменьшение массопереноса жидкости и растворов солей в бетонополимере.

### 8. 3. Термостойкость бетонополимеров при циклическом нагреве

Цементный бетон в условиях климата Средней Азии, как указывалось в гл. 1, имеет тенденцию к снижению прочностных показателей ввиду воздействия в летнее время года циклических нагревов от 10—15 до 75—80°C. В связи с этим особое значение имеет поведение в аналогичных условиях изделий и конструкций на основе бетонополимера. Полимерный наполнитель — наиболее чувствительный компонент бетонополимера к воздействию повышенных температур, однако температура его размягчения значительно выше 75—80°C, принятого за максимальный уровень в условиях сухого и жаркого климата.

Помимо температуры нагрева на эксплуатационные свойства бетонополимера может влиять возникновение значительных внутренних напряжений за счет разницы значений наполнителя и бетонной матрицы.

Для изучения изменения прочности и деформативности бетонополимера при длительном циклическом нагреве были поставлены опыты по методике Ю. М. Баженова [5].

Изменение температуры нагрева образцов в опытах соответствовало экспоненциальному закону:

$$T(\tau) = T(1 - e^{-\beta_1 \tau}) + T_0, \quad (8.7)$$

при охлаждении

$$T(\tau) = \Delta T e^{-\beta_2 \tau} + T_0, \quad (8.8)$$

где  $T_0$  — температура образцов перед началом нагрева, °C;  $T = T - T_0$  — расчетный температурный перепад, °C;  $\tau$  — время нагрева (охлаждения), ч;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — эмпирические коэффициенты скорости изменения температуры образцов, ч<sup>-1</sup>.

В соответствии с (8.7) и (8.8) изменения температурных деформаций бетонополимера можно выразить в следующем виде:

$$\text{при нагреве} \quad \varepsilon(\tau) = \varepsilon_{\max}(1 - e^{-\alpha_1 \tau}), \quad (8.9)$$

$$\text{при охлаждении} \quad \varepsilon(\tau) = \varepsilon_{\max} e^{-\alpha_2 \tau}, \quad (8.10)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  — максимальное значение температурной деформации при  $T_{\max} = 80^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{\max} = 90 \cdot 10^{-5}$ ;  $\tau$  — время нагрева (охлаждения), ч;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — эмпирические коэффициенты скорости изменения температурной деформации.

После опытного определения коэффициентов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  запишем уравнение функции  $T = f_1(\tau)$  и  $\varepsilon = f_2(\tau)$ :

при нагреве

$$T(\tau) = 65(1 - e^{-2.2\tau}) + 15, \quad (8.11)$$

$$\varepsilon(\tau) = 90 \cdot 10^{-5}(1 - e^{-2.2\tau}), \quad (8.12)$$

при охлаждении

$$T(\tau) = 65e^{-0.6\tau} + 15, \quad (8.13)$$

$$\varepsilon(\tau) = 90 \cdot 10^{-5} e^{-0.5\tau}. \quad (8.14)$$

На рис. 8.1 приведена зависимость  $\varepsilon$  от  $\tau$  в интервале 0—50 циклов испытаний образцов. Как видно, при циклическом нагреве бетонополимера деформации образцов в течение цикла неизменны, однако через 50 циклов размеры образцов увеличиваются. Так, через 50 циклов испытаний остаточная деформация расширения составила  $20 \cdot 10^{-5}$  относительных единиц, причем около 60—70% этой величины приходится на первые циклы нагрева, затем процесс расширения образцов замедляется. Объяснить это явление, по нашему мнению, можно следующим образом.

Как указывалось в гл. 5, после окончания технологического процесса изготовления в структуре бетонополимера возникают сжимающие напряжения и деформации усадки составляют около  $(40—50) \cdot 10^{-5}$  относительных единиц в основном за счет контракционной усадки мономера при полимеризации.

В работе [107] отмечено, что эффект возникновения в бетонополимере внутренних напряжений может быть ликвидирован при нагреве композиции до температуры стеклования полимера. В соответствии с этим и на основании опытных данных [21, 36] можно предположить, что расширение бетонополимера при циклическом нагреве объясняется именно снятием, за счет повышенных температур, внутренних сжимающих напряжений. По мере увеличения количества цикла нагрев — охлаждение возможно полное снятие внутренних сжимающих напряжений в бетоне-матрице, в результате бетонополимерные образцы примут первоначальные геометрические размеры.

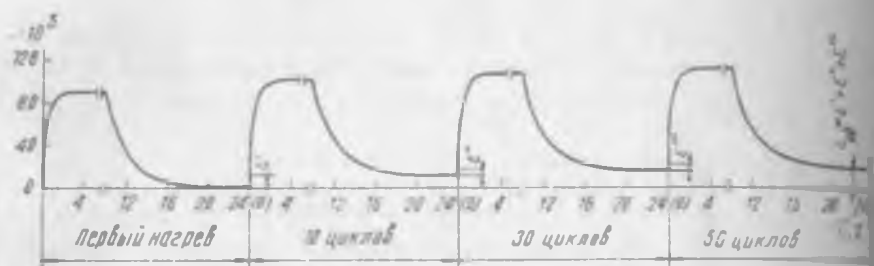


Рис. 8.1. Изменение величины относительных деформаций бетонополимера при циклическом нагреве образцов в интервале 0—50 циклов испытаний:

а' — деформации расширения после первого циклического нагрева; а'' — приращение деформаций расширения через 10 циклов испытаний по схеме «нагрев—охлаждение»; а''' — то же, через 30 циклов испытаний; аб — суммарная относительная деформация расширения через 50 циклов испытаний.

По результатам испытаний бетонополимерных и контрольных образцов получена графическая зависимость изменения прочности материалов в течение 150 циклов (рис. 8.2).

Если для бетона зависимости коэффициента термостойкости  $K_T$  от количества циклов  $n$  имеют криволинейный характер, то для бетонополимера они прямолинейны. Прямолинейная зависимость  $K_T = (n)$  у бетонополимера свидетельствует о том, что в процессе многократных циклических воздействий в бетоне происходят однотипные изменения структуры, способные накапливаться в материале пропорционально числу циклов воздействий. Этими изменениями, вероятно, могут быть микротрещины, возникшие в бетонополимере вследствие внутренних напряжений, вызванных неравномерными температурными деформациями как разнообразных минеральных компонентов бетона, так и полимера, находящегося в его порах.

Более интенсивное снижение  $K_T$  бетона может быть объяснено тем обстоятельством, что на неравномерные температурные деформации его компонентов накладывается другая деформация — усадка бетонного образца, сопровождающаяся удалением из него влаги при нагреве. В бетонополимере она отсутствует, так как технология его получения предусматривает предварительную суш-

ку исходного бетона перед насыщением полиметилметакрилатом. Последний будучи термостабильным при температурах до 150°C не подвергается деформации при 80°C. Поэтому единственную «отрицательную роль» равномерно распределенный в объеме бетона полимер может сыграть только своим большим расширением при нагреве. Однако последствия такого явления должны компенсироваться способностью полимера склеивать частицы бетона между собой, препятствуя расширению микротрещин. Это должно проявиться в первую очередь в неодинаковом снижении предела

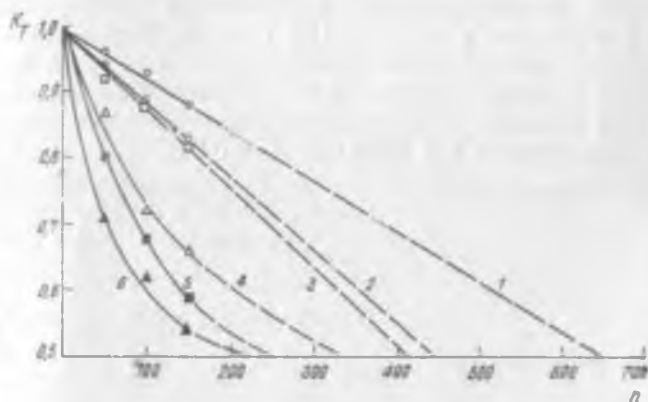


Рис. 8.2. Зависимость коэффициента термостойкости ( $K_T$ ) бетонополимера (1, 2, 3) и бетона (4, 5, 6) от количества циклов ( $n$ ) температурных воздействий.

1,4 — образцы серии А-1, сжатие; 2,6 — изгиб; 3,5 — образцы серии Р-1 сжатие

прочности при растяжении у бетона и бетонополимера. В нашем случае, например через 150 циклов попеременного нагрева и охлаждения,  $K_T$  бетонополимера оказался на 35—40% выше, чем у бетона при испытании на сжатие, в то время как при испытаниях на изгиб  $K_T$  бетонополимера больше на 52—55%, т. е. обеспечена относительно большая сохранность прочности и на растяжение.

Для определения влияния состава бетона на термостойкость бетонополимера, помимо описанных, были проведены дополнительные испытания бетонополимеров, полученных пропиткой мелкозернистого бетона состава А-1. Из результатов (рис. 8.2) можно заключить о пониженной термостойкости мелкозернистого бетона и бетонополимера на его основе.

Путем графического экстраполирования результатов, приведенных на рис. 8.2, было приблизительно определено количество циклов температурных воздействий, после которых должна наступить потеря половины исходной прочности материала. Значение  $K_T = 0,5$  достигается у бетона состава А-1 примерно через 230 и 325 циклов, у бетонополимера через 450 и 650 циклов при испытаниях на изгиб и сжатие соответственно. Для мелкозернистого

бетона и бетонополимера на его основе снижение прочности на сжатие вдвое наблюдается через 220 и 420 циклов соответственно.

В работах [48, 76] показано, что повысить термостойкость полимеров, применяемых для получения бетонополимеров, можно в результате использования специальных сшивающих добавок, образующих при полимеризации мономеров поперечные связи в структуре полимерного наполнителя.

Исследованный в данной работе пропиточный состав на основе стирола и сшивающего агента дивинилбензола был использован для получения бетонополимера, испытанного на термостойкость по принятой методике в течение 100 циклов. Результаты испытаний показывают, что образцы (бетон серии А-1)  $3 \times 3 \times 3$  см, пропитанные сополимером стирола и дивинилбензола, не снизили прочности при сжатии, тогда как при использовании для модифицирования полистирола без добавок  $K_T = 0,94$ :

| Пропиточный состав       | Предел прочности при сжатии $R_{6п}$ (МПа) и коэффициент термостойкости $K_T$ через циклы |      |      |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
|                          | 0                                                                                         | 50   | 100  |
| Стирол                   | 108                                                                                       | 103  | 97   |
|                          | —                                                                                         | 0.95 | 0.90 |
| Стирол+2% дивинилбензола | 116                                                                                       | 115  | 114  |
|                          | —                                                                                         | 0.99 | 0.98 |

Повышение термостойкости бетонополимеров на основе стирола и дивинилбензола объясняется созданием пространственной структурной сетки в сополимере, что приводит к уменьшению подвижности больших участков цепей полимера. В связи с тем, что именно подвижность больших участков определяет изменение температуры стеклования полимеров  $T_g$  для сшитого сополимера на основе стирола и дивинилбензола значение  $T_g$  значительно повышается по сравнению с обычным полистиролом.

Таким образом, на основании опытных данных можно сделать вывод, что при циклическом воздействии повышенных температур, снижение прочности бетонополимера происходит примерно вдвое медленнее обычного исходного бетона.

#### 8. 4. Климатическое старение бетонополимеров

Как указывалось в гл. 1, наиболее подверженным атмосферному старению компонентом бетонополимера является полимер. Для оценки изменения свойств бетонополимера при воздействии атмосферных факторов в условиях Средней Азии проводили экспонирование бетонополимерных образцов  $35 \times 35 \times 140$  см серии А-1 на стендах климатической станции в г. Ташкенте (рис. 8. 2). В качестве показателя атмосферостойкости был выбран предел прочности на растяжение при изгибе. Величина предела прочности на растяжение при изгибе в течение двух лет испытаний в бетонополимерных образцах практически была на исходном уровне.

Известно [126], что деструкция полимера в крупноразмерных образцах развивается лишь в поверхностных слоях, затем продукты деструкции препятствуют развитию этого процесса в глубь материала. В бетонополимере полимер защищен от прямого солнечного воздействия слоем бетона толщиной 1—2 мм, оставшимся в

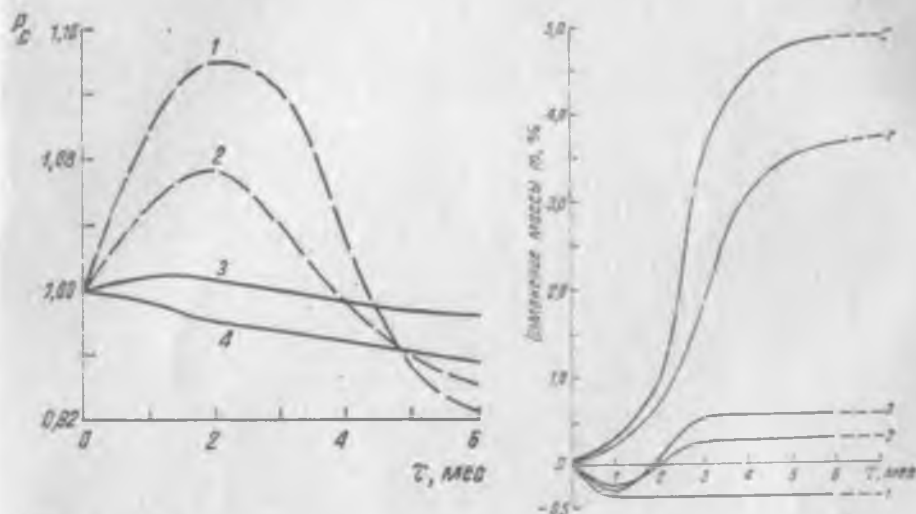


Рис. 8.3. Зависимость коэффициента атмосферостойкости  $P_c$  бетона (1,2) и бетонополимера (3,4) от времени экспонирования образцов:

1,4—АИП „Ксенотест-450“+10%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 2,3—10%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Рис. 8.4. Зависимость изменения массы  $m$  бетонополимера (1, 2, 3) и бетона (4, 5) от продолжительности экспонирования в АИП „Ксенотест-450“:

1—АИП „Ксенотест-450“; 2,4—10%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 3,5—АИП „Ксенотест-450“+10%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

результате испарения мономера при его полимеризации. Таким образом, если в полимере, содержащемся в бетонополимере, и происходит изменение исходных показателей, то это практически не влияет на свойства всей композиции. Поэтому был сделан переход на исследование атмосферостойкости мелкозернистых бетонополимеров призм  $10 \times 10 \times 30$  мм серии А-1.

Для прогнозирования атмосферостойкости бетонополимера параллельно со стендовыми проводились искусственные климатические испытания на установке «Ксенотест-450» по ускоренной программе для полимерных пленок (рис. 8.3).

Программа следующая: суточный режим из 18 ч экспонирования образцов под действием света — «световое время» и 6 ч «отдыха» образцов без света — «темное время».

Испытание в световое время состоит из трех периодов. Режим I и III периодов: световое время — 7,5 ч, температура воздуха —  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха — 70%, дождевание — по циклу 118/2 (118 мин облучение без дождевания, 2 мин — то

же, с дождеванием). Режим II периода: световое время—3 ч, температура воздуха—45°C, относительная влажность воздуха—38%, дождевание—по циклу 118/2.

«Отдых» образцов с увлажнением осуществлялся при температуре воздуха  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ , относительной влажности воздуха 70%.

Все переключения в аппарате осуществляются автоматически.

Одновременно проводилось экспонирование аналогичных бетонополимерных призм при тех же световых и температурных режимах в 10%-ном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Это испытание во многом моделирует климатические условия, в которых эксплуатируется железобетонная конструкция.

На рис. 8.4 показаны зависимости изменения массы бетонополимера от продолжительности экспонирования в аппарате искусственной погоды (АИП). Для сравнения приведены данные для непропитанных образцов, хранившихся в 10%-ном растворе как в темноте, так и в АИП.

Как видно (рис. 8.4, 1, 2, 3), первоначально масса всех бетонополимерных образцов независимо от условий испытаний снизилась на 0,3—0,4%. Это вызвано по нашему мнению, либо удалением в раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , либо испарением незаполимеризовавшейся части мономера, имеющейся в образцах.

В дальнейшем для бетонополимера, испытываемого по вышеприведенной ускоренной программе, характерна стабилизация его массы в течение всех месяцев испытаний (рис. 8.4, 1). Масса бетонополимеров, испытываемых в 10%-ном растворе как в АИП, так в темноте, увеличивалась до трех месяцев испытаний, в дальнейшем изменения массы не наблюдаются. Причем масса образцов, испытываемых в АИП (рис. 8.4, 3), увеличивалась примерно в 2 раза быстрее, чем образцов, хранившихся в темноте (рис. 8.4, 2), что может быть объяснено повышенными положительными температурами в АИП, ускоряющими процессы массопереноса солей в образцы.

В общем увеличении массы бетонополимера в растворе сернокислого натрия объясняется накоплением солей в незаполненных полимером порах и пустотах бетона.

В непропитанных бетонных образцах при испытаниях масса интенсивно увеличивается под действием кристаллизации солей в порах бетона. Для бетонных образцов, экспонируемых в АИП, как и для бетонополимеров, изменение массы было заметнее (рис. 8.4, 5), чем для образцов, хранившихся в темноте при нормальной температуре (рис. 8.4, 4).

Один из существенных показателей атмосферостойкости материалов—предел прочности при статическом изгибе. Поэтому, как указывалось в гл. 2, определялся коэффициент сохранения свойств материалов  $R_c$  при статическом изгибе в результате атмосферного воздействия.

Ниже приводятся значения коэффициента сохранения свойств бетонополимера во времени при экспонировании в 10%-ном раст-

воре  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в АИП и в темноте. Как видно, максимальное снижение прочности при статическом изгибе для бетонополимера, экспонированного в АИП, составило 4,2%, т. е. в 1,5—2 раза было выше, чем для образцов, хранившихся в течение того же периода времени в растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , но в темноте.

Для непропитанных бетонных образцов картина изменения прочности в растворе сернокислого натрия вполне удовлетворительно объясняется данными, приведенными выше, и исследованиями многих авторов по вопросу солевой физической коррозии бетона.

Известно, что для прогнозирования атмосферостойкости материалов необходимо сопоставление — «корреляция» опытных данных по результатам естественных климатических испытаний и ускоренных искусственных испытаний в АИП. Под словом «корреляция» принято соотношение между величинами времени старения материала по одинаковому характерному показателю при испытаниях образцов под действием естественных и искусственных климатических факторов [21], иными словами, определение соотношения скоростей старения для двух видов испытаний без анализа кинетики процесса старения.

Распространенный метод определения коэффициента ускорения — метод соотношения времени, за которое материал теряет свои физико-механические свойства в естественных и искусственных климатических условиях.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований автора по изучению атмосферостойкости бетонополимера в естественных и искусственных климатических условиях:

| Вид климатических испытаний | Предел прочности при изгибе $R_t$ и коэффициент атмосферостойкости $R_t/R_0$ |                      |                      |                      |                      |                      |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                             | через месяцы испытаний                                                       |                      |                      |                      |                      |                      |
|                             | 2                                                                            | 4                    | 6                    | 12                   | 18                   | 24                   |
| Естественные на стендах     | —                                                                            | —                    | $\frac{127.0}{0.99}$ | $\frac{126.0}{0.99}$ | $\frac{125.0}{0.99}$ | $\frac{125.0}{0.98}$ |
| Искусственные в аппарате    |                                                                              |                      |                      |                      |                      |                      |
| «Ксенотест-450»             | $\frac{127.0}{0.98}$                                                         | $\frac{126.0}{0.98}$ | $\frac{125.0}{0.98}$ | —                    | —                    | —                    |

Примечание. Каждое значение  $R_0$  и  $R_t$  получено как результат усреднения показателей прочности 12 образцов-близнецов; коэффициент вариации 0,032; среднее значение предела прочности при изгибе до испытаний  $R_0$ —128,5 МПа.

Как видно из приведенных данных, в течение двух лет экспонирования на прочность 7—8 исходных образцов  $1 \times 1 \times 3$  см режим А-1 при статическом изгибе существенно не изменилась, коэффициент атмосферостойкости составил 0,98. Для испытаний, проводимых в аппарате «Ксенотест-450» через 6 мес. экспонирования по принятой ускоренной программе коэффициент  $R_t/R_0=0,97$ .



Таким образом, испытание в АИП примерно в 6 раз ускоряет, по сравнению с естественными стандартными испытаниями, деструктивные процессы в материале, вызванные климатическими воздействиями. В целом же высокие показатели коэффициента атмосферостойкости для обоих видов климатических испытаний позволяют характеризовать бетонополимер как материал весьма стойкий к воздействию сухого жаркого климата.

## **Глава 9. ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНОПОЛИМЕРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

### **9.1. Области применения изделий из бетонополимера в районах с сухим жарким климатом**

Климатические условия республик Средней Азии не позволяют использовать конструкции и изделия из обычного железобетона. Повышенная температура, низкая относительная влажность воздуха, большие суточные амплитуды колебаний температуры, наряду с засоленными почвами в ряде районов способствуют преждевременному снижению эксплуатационных свойств бетонных и железобетонных конструкций. Поэтому применение бетонополимерных изделий и конструкций в условиях сухого жаркого климата может значительно продлить срок их службы.

Большие перспективы для использования бетона, пропитанного мономерами, открывает водохозяйственное, электроэнергетическое и гидротехническое строительство.

Развитие водохозяйственного строительства в районах с сухим жарким климатом и засоленными грунтами требует применения в некоторых случаях бетонополимерных напорных и безнапорных труб. Особенно это перспективно для изготовления напорных труб диаметром 100—150 мм, ибо изготовление железобетонных труб малых сечений трудоемко и дорого [22].

Одно из направлений применения бетонополимеров — использование для строительства железобетонных испарительных камер (лотков) при опреснении морской и соленых вод. Такие камеры до настоящего времени изготавливают из нержавеющей стали и цветных металлов. Стоимость их в 1,5—2 раза выше стоимости железобетонных опреснительных лотков [21]. В то же время использование обычных цементных бетонов в суровых условиях работы опреснителей с их высокой пористостью и низкой солеустойчивостью приводит к быстрому разрушению конструкций. Замена обычных бетонов в этих конструкциях полимерцементными и полимерсиликатными композициями повышает эксплуатационную стойкость опреснителей. Однако эти композиционные материалы в 2—10 раз превышают стоимость обычного железобетона. Кроме того, они имеют недостаточную термо-, соле- и щелочестойкость и на их изготовление расходуется большое количество дефицитных смол.

Использование бетонополимеров при изготовлении опреснительных установок с их высокими показателями прочности, плотности, водонепроницаемости, термо- и солестойкости может, по нашему мнению, оказаться перспективным и оправданным.

В настоящее время ведутся работы по использованию бетонополимеров для изготовления изолирующих элементов опор высоковольтных линий электропередачи [75, 76]. Изолирующие элементы представляют собой траверсы сечением  $100 \times 100$  мм для крепления проводов на промежуточных опорах без применения изоляторов. Повышенная плотность и трещиностойкость бетонополимерных траверс, следовательно, и высокие диэлектрические свойства позволяют применять их при строительстве опор ЛЭП и в районах с сухим жарким климатом без опасения возникновения в них пробойных напряжений.

Бетонополимерные материалы могут широко использоваться для изготовления плит и бордюрных камней в дорожном строительстве, а также при устройстве полов в условиях воздействия на них агрессивных сред. При этом бетонные изделия целесообразно пропитывать не на всю глубину, а только на 10—15 мм.

Бетонополимерные тубинги и другие элементы тоннельной отделки можно успешно использовать при строительстве Ташкентского метрополитена в грунтах с повышением солесодержанием, при возведении сооружений промышленного, энергетического и другого строительства, осуществляемого в районах с сухим жарким климатом.

## 9. 2. Технология изготовления лотков солнечных опреснителей

Дефицит пресной воды в засушливых районах — серьезная мировая проблема. Одним из решений ее считается опреснение высокоминерализованных и загрязненных вод. Известно большое число способов опреснения. Гелноопреснение заключается в том, что определение соленой воды осуществляется за счет выпаривания ее с помощью солнечной энергии. Область применения этого способа — районы земного шара в зоне  $145^\circ$  с. и ю. ш., т. е. районы с сухим и жарким климатом.

Впервые гелиоопреснение в большом производственном масштабе начали применять более 100 лет назад в Чили. В настоящее время в мире работает более 30 крупных солнечных опреснителей производительностью свыше  $10 \text{ м}^3/\text{сутки}$  дистиллята.

В Туркмении, Узбекистане, южных районах Казахстана и в других областях для пастбищного животноводства дополнительно можно использовать многие миллионы гектаров пустынь и полупустынь при условии обеспечения животных водой. Эффективным направлением для решения этой проблемы является гелиоопреснение соленой воды на пастбищах, широкое строительство водопойных пунктов с солнечными опреснителями в аридной зоне. Солнечные опреснители в перспективе, помимо

пастбищного животноводства, будут широко применяться в гидрогеологических изысканиях (получение дистиллята для охлаждения дизелей буровых установок при бурении скважин), при строительстве в пустынях для питьевых и технологических целей.

В 1975 г. Гипроводхоз в соответствии с научными рекомендациями Физико-технического института АН Туркменской ССР разработал технико-рабочий проект водопойного пункта с солнечной опреснительной установкой (рис. 9.1). Проект рассчитан для осуществления его в условиях пустыни Каракум (Туркмения) и должен обеспечить водопой одной отары овец в 1000 голов. Основной рабочий орган опреснительной установки — секция лотков из сборного железобетона. Однако лотки после двух—трех лет эксплуатации разрушаются. Основные причины их разрушения — интенсивные процессы коррозии бетона и арматуры, термодиструкция и низкая морозоустойчивость изделий.

В соответствии с вышесказанным для изготовления лотков секций гелиоопреснителей можно эффективно применять бетонополимер (рис. 9.2).

Секция гелиоопреснителя состоит из двух основных частей — железобетонных лотков и светопрозрачной кровли, которые герметично соединены между собой и образуют замкнутый объем.

Конструкции лотков имеют три модификации: а) лоток с одной торцевой стенкой, содержащей закладные детали для залива соленой воды, слива рассола и дистиллята; б) лоток тех же размеров и той же конфигурации, но без торцевой стенки; в) лоток с одной торцевой стенкой, но без закладных деталей для залива соленой воды, слива рассола и дистиллята.

Лотки собираются в секцию из одного торцевого, двух одинаковых средних марки Л-2 и одного крайнего лотков.

Для бетонирования в НИИЖе была изготовлена опалубка для каждой марки лотков. Уплотнение бетонной смеси осуществлялось на вибростоле в течение 6—8 мин. Отформированные изделия твердели в течение 28 сут, в нормально-влажных условиях.

Пропитка железобетонных лотков гелиоопреснителей полимеризующимся составом осуществлялась согласно технологической схеме, приведенной в гл. 3. Для этого была спроектирована и изготовлена опытная установка, позволяющая производить сушку, пропитку и полимеризацию.

Установка представляет собой прямоугольную емкость с герметически закрываемой крышкой, в которую одновременно загружаются два изделия. Между лотками устанавливается металлический вкладыш для сокращения расхода мономера при пропитке и для размещения в нем объемного воздушного ТЭНа мощностью 6 кВт. В корпусе имеются отверстия с кранами для вакуумирования и слива пропиточного состава. На крышке размещены вакууммер и патрубок с краном для залива пропиточного состава горячей воды при его последующем отверждении.

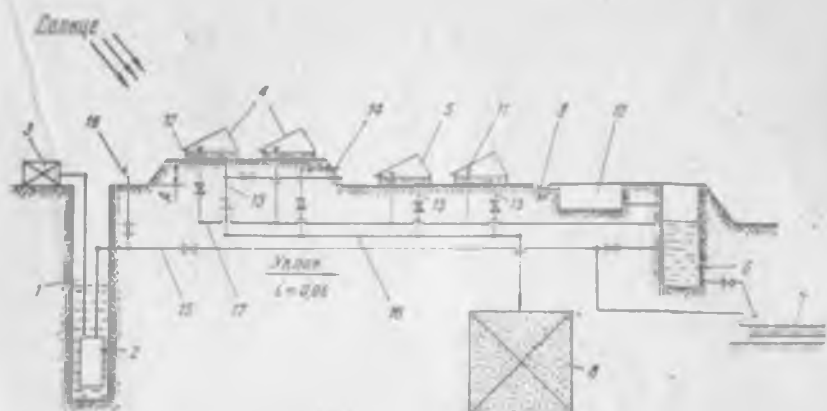


Рис. 9.1. Принципиальная технологическая схема водопойного пункта:

1—водосточник; 2—водоподъемник; 3—энергоустановка; 4—резервуарные секции; 5—рабочие секции; 6—резервуар водопойной воды; 7—водопойное корыто; 8—выпарная площадка утилизации рассола; 9—водосборная канавка для вых. вод.; 10—отстойник для внешних вод; 11—желобок сбора дистиллята; 12—заливочный штуцер исходной соленой воды; 13—штуцер слива рассола; 14—дополнительные отводы; 15—трубопровод исходной соленой воды; 16—отвод для подключения к штуцеру (12); 17—трубопровод дистиллята; 18—трубопровод слива рассола.

Сушка загруженных в установку лотков производилась при температуре 130—140°C с принудительной вентиляцией. Температура сушки контролировалась электрическим контактным термометром.

| Показатели                                                    | Величина |
|---------------------------------------------------------------|----------|
| Расход составляющих на 1м <sup>3</sup> бетона (серия А-1), кг |          |
| портландцемент М-500 Белгородского зав. дз                    | 300      |
| песок строительный рядовой с $M_{кр}=2,1$                     | 835      |
| щебень гранитный фракции 5—10 мм                              | 1680     |
| вода                                                          | 165      |
| Объемная масса бетона, кг/м <sup>3</sup>                      | 440      |
| Расход бетона на одно изделие, м <sup>3</sup>                 |          |
| лотки Л-1, Л-3                                                | 0,20     |
| лоток Л-2                                                     | 0,18     |
| Масса одного изделия, кг                                      |          |
| лотки Л-1, Л-3                                                | 440      |
| лоток Л-2                                                     | 395      |
| Предел прочности при сжатии, МПа                              | 32       |

На заключительном этапе сушки, который определяется по изменению массы контрольных образцов, помещенных вместе с лотками в установку, производилась вакуум-сушка для удаления остаточной влаги в бетоне и дегазации изделий. Продолжительность сушки при температуре 130—140°C 36 ч. После охлаждения изделий до температуры 16—20°C в течение двух часов производилось повторное вакуумирование при разряжении 0,0015 МПа.

Пропитка осуществлялась при атмосферном давлении в течение 8 ч. Уровень залива мономера контролировался по специально установленному в одном из торцов установки мерному стеклу.

В качестве пропиточного состава использовалась смесь мономеров стирола и метилметакрилата в равных частях по массе. Иницирование полимеризации мономеров осуществлялось порофором в количестве 0,5% массы пропитки. Отверждение мономеров в поровой структуре изделия проводили по термokatалитическому механизму, в воде, нагретой до 75—80°C в течение 8 ч. При этом воздушный ТЭН, применяемый для сушки изделий, заменялся тремя водяными нагревателями с автоматической системой регулирования температуры.

После полимеризации лотки прогревались до температуры

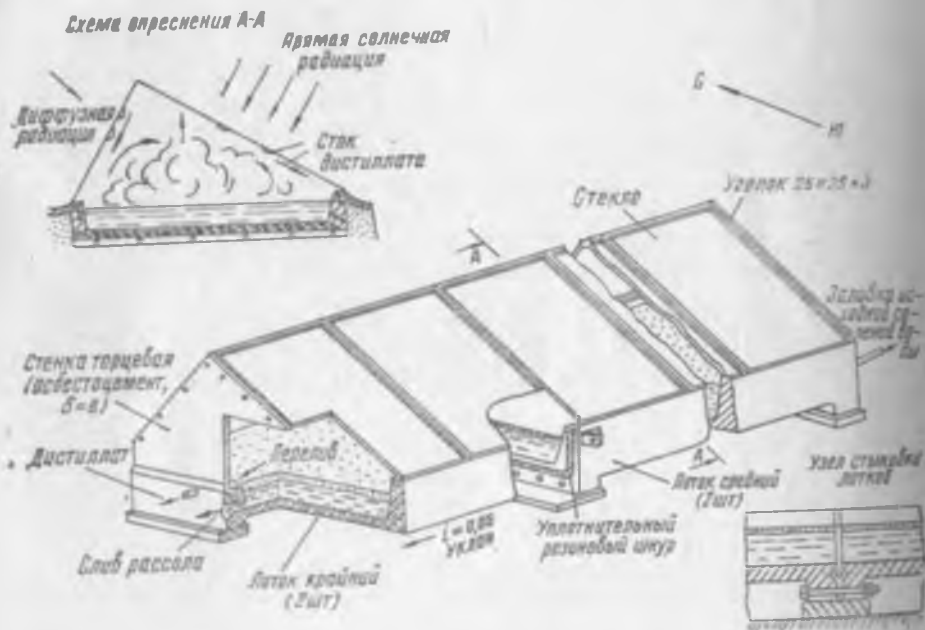


Рис. 9.2. Схема гелиоопреснителя.

100°C в течение 2 ч для удаления влаги с поверхности и снятия внутренних напряжений и отгружались на склад готовой продукции.

У образцов-спутников 7×7×7 см, которые подвергались модифицированию полимером одновременно с лотками, после пропитки водопоглощение составило 0,3%, предел прочности на сжатие — 120 МПа.

Таким образом, полученные результаты по изготовлению бетонополимерных лотков секции солнечного опреснителя доказывают возможность их получения в условиях серийной заводской технологии.

### 9.3. Экономическая эффективность применения бетонополимеров

Бетонополимеры, наряду с положительными свойствами, имеют и такие недостатки, как сложность технологического процесса обработки бетонов мономерами и необходимость использования дополнительного оборудования, токсичность и горючесть пропиточных материалов, высокую себестоимость 1 м<sup>3</sup> бетонополиме-

Таблица 9.1

Характеристика и результаты расчета некоторых видов конструкций

| Конструкция                                                                                   | Расход бетона, м <sup>3</sup> |                  | Стоимость конструкций в деле, руб. |                  | Затраты, руб. (с учетом эксплуатации) |                  | Экономия, руб. (%) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------|
|                                                                                               | аналог                        | новая технология | аналог                             | новая технология | аналог                                | новая технология |                    |
| Решетчатые полы и элементы конструкций жилищно-коммунальных помещений, 100 м <sup>2</sup>     |                               |                  |                                    |                  |                                       |                  |                    |
| для свиней                                                                                    | 3,49                          | 2,97             | 283,04                             | 500,18           | 755,19                                | 659,27           | 95,92 (13)         |
| для крупного рогатого скота                                                                   | 8,59                          | 6,01             | 696,65                             | 1012,14          | 1858,77                               | 1334,06          | 524,71 (28)        |
| Конструкции многоэтажных промышленных зданий с сильно-агрессивной средой (одна ячейка 6×24 м) |                               |                  |                                    |                  |                                       |                  |                    |
| колонны                                                                                       | 21,46                         | 17,93            | 2564,52                            | 3495,07          | 3563,63                               | 3503,10          | 60,53 (2)          |
| плиты перекрытий                                                                              | 74,40                         | 74,40            | 7907,14                            | 13025,33         | 14511,7                               | 14023,52         | 488,19 (3)         |
| Солнечные опреснители (площадь 19 м <sup>2</sup> )                                            | 2,54                          | 1,90             | 325,87                             | 518,03           | 1003,63                               | 573,38           | 430,25 (43)        |

ра. В связи с этим на начальной стадии внедрения бетонополимеров следует ограничиться теми случаями, когда из-за специальных эксплуатационных требований другие строительные материалы не могут быть использованы. При этом эффективность применения изделий и конструкций из бетонополимеров может быть высокой только тогда, когда в них будут реализованы одновременно многие положительные свойства бетонополимеров.

Для оценки экономической эффективности применения бетонополимеров в качестве примеров нами выбраны следующие конструкции из разных областей промышленности:

1) электроизолирующие бетонополимерные траверсы со стеклопластиковой арматурой для линий электропередач напряжением

10—35 кВ взамен металлических траверс с фарфоровыми изоляторами. Сокращение расхода металла примерно 340 кг на 1 км ВЛ, снижение трудовых затрат — 7 чел.—4;

2) конструкции лотков солнечных опреснителей взамен лотков из бетона на сульфатостойком цементе; прочность конструкции увеличилась в 4 раза, долговечность — с 3 до 10 лет;

3) решетчатые полы животноводческих помещений взамен решеток из бетона марки 400; марка бетона возросла в 4 раза, что позволило снизить толщину плиток полов с 60 до 50 мм, долговечность увеличить с 7—8 лет до 25;

4) конструкции многоэтажных производственных зданий (колонны, ригели, плиты) для производства с сильноагрессивной газовой средой взамен тех же конструкций с защитными лакокрасочными покрытиями. Межремонтный период у конструкций из бетонополимера возрастает у колонн с 40 до 60, у плит — с 15 до 25 лет. Сечение колонн изменяется за счет увеличения прочности бетонополимера с  $40 \times 60$  до  $40 \times 40$ . Общий расход бетона на колонны снижается с 21,46 до 17,93 м<sup>3</sup>.

При сравнении строительных конструкций срок их службы приравнивается к сроку службы зданий или сооружений. Затраты и издержки при эксплуатации зданий и сооружений учитываются за весь срок службы и приводятся к началу эксплуатации.

Характеристика и результаты расчета некоторых видов конструкций приведены в табл. 9.1. Относительно низкий процент экономической эффективности по колоннам и плитам зданий с сильноагрессивной средой объясняется тем, что для сравнения за аналог были приняты железобетонные конструкции с защитой лакокрасочными материалами. Как видно из табл. 9.1, экономическая эффективность применения конструкций из бетонополимера различна и зависит от множества факторов, в том числе и от аналога, принятого за сравнение. Например, от применения бетонополимеров в электроизолирующих траверсах ВЛ она варьирует от 50 до 150 руб./км, экономия металла — от 140 до 336 кг.

Расчеты ЦНИИПромзданий показали, что экономический эффект 1 м<sup>2</sup> развернутой площади четырехэтажного двухпролетного здания с сильноагрессивной средой составил 10,49 руб.

Таким образом, несмотря на увеличение расчетной стоимости конструкций «в деле» почти вдвое, затраты по рассмотренным вариантам уменьшаются от 2 до 40%, экономия достигается за счет снижения эксплуатационных расходов. Применение конструкций из бетонополимеров позволяет сэкономить значительное количество стали, цемента, на 15—20% снизить объем бетона и массу конструкций. Следовательно, применение бетонополимеров в ряде конструкций уже в настоящее время является технически возможным и экономически целесообразным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М., 1973.
2. Александровский С. В., Серых Р. Л. Ползучесть бетонополимеров при сжатии.— Изв. вузов. Строительство и архитектура. № 4, 1979.
3. Бабушкин В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М., Стройиздат, 1968.
4. Багдасарян Х. С. Теория радикальной полимеризации М., Наука, 1966.
5. Баженов Ю. М. Критерий оценки поведения бетона в жарком сухом климате.— Бетон и железобетон, 1971, № 8.
6. Баженов Ю. М. Технология бетона. М., Высшая школа, 1978.
7. Баженов Ю. М., Косенко В. С. Транспортное строительство. 1974, № 7.
8. Баженов Ю. М., Курячая В. А., Ольгинский А. Г., Спирин Ю. А., Угинчус Д. А. Исследование структурных особенностей бетонополимерных материалов.— В кн.: Гидротехника. Вып. 55. М., 1975.
9. Баженов Ю. М., Угинчус Д. А., Улитина Г. А.— В кн.: Гидротехника. Вып. 55. М., 1975.
10. Баженов Ю. М., Угинчус Д. А., Улитина Г. А. Бетонополимерные материалы и изделия. Харьков, 1978.
11. Батраков В. Г. Автореферат кандидатской диссертации. М., НИИЖБ, 1962.
12. Батраков В. Г. Повышение долговечности бетона добавками кремнийорганических полимеров. М., Стройиздат, 1968.
13. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М., Госстройиздат, 1962.
14. Божич И. В. и др. В кн. Повышение коррозионной стойкости бетона и железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1975.
15. Брык М. Т. В сб. Итоги науки и техники. Химия и технология высокомолекулярных соединений. Т. 4. М., ВИНТИ, 1973.
16. Бриллинг Р. Е. Миграция влаги в строительных ограждениях. В кн. Исследования на строительной физике. М.—Л., Госстройиздат, 1949.
17. Волгушев А. Н., Патуроев В. В., Путляев И. Е., Красильникова О. М. Применение серы для пропитки паровой структуры строительных материалов.— Бетон и железобетон, 1976, № 11.
18. Горчаков, Г. И. и др. Вяжущие вещества, бетоны и изделия на их основе. М., Стройиздат, 1977.
19. Грасси И. Химия процессов деструкции полимеров. М., 1959.
20. Гуль В. Е., Кулезиев В. Е. Структура и механические свойства полимеров. М., Высшая школа, 1966.



21. Джабаров В. М. Разработка технологии и изучение свойств бетонополимеров для применения в условиях сухого жаркого климата. Канд. дисс. М., НИИЖБ, 1978.
22. Джабаров В. М., Серых Р. Л., Максимов Ю. В. Влияние физико-механических свойств исходного бетона на прочность бетонополимера.— В кн. Физико-химические свойства бетонов с полимерами. Вильнюс, 1978.
23. Дмитриев А. С., Гренроз В. А. Образование трещин в сооружениях, эксплуатируемых в сухом жарком климате— Бетон и железобетон 1971, № 8.
24. Егоров Ю. В. Исследование технологических особенностей и свойств бетонополимеров. Автореф. дисс., М., 1975.
25. Жуков В. В., Перегудов В. В. Технология первого нагрева тепловых агрегатов из жаростойкого бетона до рабочей температуры при одностороннем нагреве.— В кн. Жаростойкий бетон и железобетон в строительстве. М., Стройиздат, 1966.
26. Жуков В. В., Райнхард Б. Определение допускаемых скоростей нагрева тепловых агрегатов.— Бетон и железобетон, 1973, № 9.
27. Иванов Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М., Транспорт, 1968.
28. Идори Г. М., Фердеш З. Ф. Цементно-полимерные материалы. В кн.: Труды VI Международного конгресса по химии цемента. Т. III. М., Стройиздат, 1976.
29. Инструкция по учету особенностей свойств бетона, пропитанного полимерами, при расчете армированных конструкций. РСН 77-80, Вильнюс, 1980.
30. Каганер М. Г. Зависимость адсорбции азота от диаметра пор адсорбента— ЖФХ, 1968, 42, № 5, 1228.
31. Каганер М. Г. Тепломассообмен в низкомолекулярных теплоизоляционных конструкциях. М., Энергия, 1979.
32. Калатуров Б. А. и др. Усадочно-температурные деформации бетона при нагреве.— В кн.: Работа железобетонных конструкций при высоких температурах. М., Стройиздат, 1972.
33. Канцпольский С. И. и др. Долговечность бетонов в районах с сухим и жарким климатом и засоленными грунтами. Ташкент, «Фан» УзССР, 1967.
34. Каранфилов Т. С., Максимов Ю. В. Сравнительные данные по разбросу призмной прочности бетона и бетонополимера.— Строительные материалы и изделия. Реф. инф. ЦИНИС. Вып. 4. 1978, с. 3.
35. Карасев И. М. Усадка и ползучесть бетона при циклических нагревах. Автореф. канд. дисс. М., НИИЖБ, 1972.
36. Касимов И., Джабаров В. М., Серых Р. Л., Максимов Ю. В. Получение и использование бетонополимера.— Строительство и архитектура Узбекистана. 1978, № 2.
37. Касимов И. Основы модификации бетонов термопластичными композициями. Автореферат докторской диссертации. М., 1982.
38. Коротков С. Н., Свечин И. В., Аронов Р. И. Влияние ранней сушки бетона на его структуру и сцепление с арматурой. ВНИИСтром. № 4. (32), М., 1965.
39. Крешер О. Научные основы техники сушки. М., 1980.
40. Ларионова З. М. Формирование структуры цементного камня и бетона. М., Стройиздат, 1970.
41. Лещинский М. Ю. Испытание бетона.— Справ. пособие. М., Стройиздат, 1980.
42. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров. М., Химия, 1977.
43. Лыков А. В. Теория сушки, М., Энергия, 1968.
44. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М., Химия, 1970.
45. Максимов Ю. В., Горшков В. С., Хмелевская Т. С., Крылова Р. Г. Исследование наполненной ненасыщенной полиэфирной смолы методом ДТА.— В кн.: Наполнители для полимерных строительных материалов. Сб. трудов ВНИИНСМ. Вып. 25 (33). 1969, с. 94.

46. Максимов Ю. В., Михайлова Т. В. Экономическая эффективность применения бетонополимеров в строительстве «Противокоррозионные работы в строительстве», № 3 (138), 1980.
47. Максимов Ю. В., Никонов М. Р. и др. Авт. свид. СССР № 619472, Б. И., 1978, № 30.
48. Максимов Б. В., Огнева Н. Е. и др. Оптимальные условия сополимеризации стирола и дивинилбензола в паровом пространстве бетона.— Сб. научн. тр. ТашПИ, 1978.
49. Мощанский И. А., Касимов И. Повышение плотности и прочности бетона и кирпича.— Строительные материалы, 1965, № 3.
50. Малкин А. Я., Вольфсон С. А. и др. Полистирол. М., Химия, 1975.
51. Малмейстер А. К. и др. Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига, Зинатне, 1972.
52. Марчукайтис Г. В. Пропитанный мономерами бетон и железобетон. Вильнюс, 1975.
53. Марчукайтис Г. В. Влияние пропитки бетона мономерами на его деформативные свойства.— Бетон и железобетон, 1977, № 6.
54. Матъязов С., Чеховский Ю. В., Касимов И. Исследование влияния пропитки бетона мономером на сцепление заполнителей вяжущим.— Реф. инф. ВНИИСЭМ, серия сб. т/б. Вып. 5, М., 1976.
55. Материалы II Всесоюзного координационного совещания по проблеме «Технология бетонных работ в условиях сухого жаркого климата». 4—7 июня 1974, Ашхабад, 1976.
56. Мелкумов А. Н. и др. Климатические испытания пластмасс в Узбекистане. Ташкент, Узбекистан, 1971.
57. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона. М., НИИЖБ Госстроя СССР, 1975.
58. Милованов А. Ф. Жаростойкий железобетон. М., Стройиздат, 1963.
59. Милованов А. Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1975.
60. Москвин В. М. Бетон для морских гидротехнических сооружений. М., Госстройиздат, 1949.
61. Москвин В. М. Коррозия бетона. М., Госстройиздат, 1952.
62. Мощанский Н. А. Плотность и стойкость бетона. М., Госстройиздат, 1951.
63. Минас А. И. Автореферат докторской диссертации. М., 1961.
64. Минас А. И. К вопросу о механизме коррозирования строительных материалов солями и щелочами.— Доклады на Всесоюзном научно-техническом совещании по солевой коррозии. Минск, 1965.
65. Мионов С. А., Малинина Л. А. Ускорение твердения бетона. М., Госстройиздат, 1964.
66. Мионов С. А., Малинина Л. А. и др.— Бетон и железобетон, 1965, № 8.
67. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Сушка и первый нагрев тепловых агрегатов из жаростойких бетонов. М., Стройиздат, 1976.
68. Никонов М. Р. Исследование кинетики процесса пропитки бетона метилметакрилатом.— Тр. института Водгео. Гидротехника. Вып. 55. 1975, 25.
69. Носарев А. В., Антропова Е. А., Колпаков В. Н., Сошников В. В., Райчук Ф. З. Исследование механических свойств рационально-модифицированного бетонополимера при действии кратковременной нагрузки.— Транспортное строительство. 1976, № 9.
70. Патуrows В. В. Технология полимербетонов. М., Стройиздат, 1977.
71. Патуrows В. В., Серых Р. Л., Джабаров В. М., Юсупов Р. А. Влияние армирования на напряженно-деформированное состояние бетонополимера.— Бетон и железобетон, 1980, № 4.
72. Пауэрс Т. К. Физическая структура портландцементного теста.— В кн.: Химия цементов. М., Стройиздат, 1969.
73. Петров-Денисов В. Г., Масленников Л. А., Пичков А. М.

- Исследование процесса сушки жаростойкого бетона.— В кн.: Жаростойкий бетон и железобетон в строительстве. М., Стройиздат, 1966.
74. Пиевский И. М., Печуро С. С. Скоростная сушка гипсовых и гипсобетонных изделий. М., Стройиздат, 1965.
  75. Перспективы применения бетонополимеров в строительстве (тезисы докл.). Москва, апрель 1976. М., Стройиздат, 1976.
  76. Повышение долговечности промышленных изделий и сооружений за счет применения полимербетонов. Тезисы докл. Всесоюзн. конф. (Ташкент, сентябрь, 1978), М., НИИЖБ, 1978.
  77. Попченко С. Н. Применение мела пропитанного органическими вяжущими для возведения гидротехнических сооружений. Автореферат канд. дисс., Л., 1952.
  78. Покровский Н. С. Пропиточная гидроизоляция бетона. М.—Л., Энергия, 1964.
  79. Постнов М. Т. Строительные воздушонагреватели. М., Стройиздат, 1977.
  80. Попко В. Н., Бейнарович А. В., Пастухов В. Н. Свойства и структура полимерцементного бетона с эпоксидным олигомером ЭД-20.— В кн.: Повышение долговечности промышленных зданий и сооружений за счет применения полимербетонов. М., НИИЖБ, 1978.
  81. Попова О. С. Перспективы развития, составы, свойства и технология полимерцементных конструкционных материалов.— В сб. Повышение долговечности промышленных зданий и сооружений за счет применения полимербетонов. М., НИИЖБ, 1978.
  82. Ратников В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. М., Стройиздат, 1973.
  83. Рекомендации по расчету и изготовлению конструкций из бетонополимеров. М., НИИЖБ Госстроя СССР, 1980.
  84. Ромаиков П. Г., Рашковская Н. Б., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л., Химия, 1975.
  85. Соломатов В. И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны. М., Стройиздат, 1967.
  86. Салимов А. Ю. Кандидатская диссертация. Ташкент, 1975.
  87. Самигов Н. А. Кандидатская диссертация. Ташкент, 1975.
  88. Саломатов В. И., Серых Р. Л. Прочностные и деформативные свойства бетонополимера при осевом сжатии.— Реф. инф. Строительные материалы и изделия. ЦИНИС Госстроя СССР. Вып. 11. 1977.
  89. Серых Р. Л., Джабаров В. М. Исследование внутренних напряжений в составляющих компонентах бетонополимера.— Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980, № 2.
  90. Смирнов И. А. В кн.: Структура и строительно-технические свойства гидротехнических бетонов. Л., Энергия, 1972.
  91. Старосельский А. А. Электрическое сопротивление цементного камня при водонасыщении.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1974, № 3.
  92. Ступаченко П. П. Структурная пористость и проницаемость цементного камня в бетоне.— Известия вузов. Строительство и архитектура. 1958, № 3.
  93. Турапов М. Разработка технологии и изучение физико-механических свойств золобетона, пропитанного серой. Кандидатская диссертация, М., 1980.
  94. Татишвили Т. И., Росебашвили К. И., Циловани З. Н., Людвигов Р. Б. Бетонополимер и его основные физико-механические показатели. ИСМиС АН ГрузССР «Бетон и железобетон». Тбилиси, Мецнисреба, 1975.
  95. Туркестанов Г. А. Авт. свид. СССР № 125506.— Б. И. 1960, № 1.
  96. Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. М., 1967.
  97. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. М., Химия, 1974.
  98. Хорисима Н., Тадзава Э. Свойства изделий и бетонов, пропитанных мономерами.— Когэ то сейхин, 1971, № 53.
  99. Циловани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1963.

100. Цискрели Г. Д., Лекишвили Г. Л. О масштабном эффекте в бетонах.— Бетон и железобетон, 1966, № 10.
101. Цыганков И. И. Экономическая эффективность применения бетонополимеров.— В кн.: Перспективы применения бетонополимеров и полимербетонов в строительстве. М., Стройиздат, 1976.
102. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика, ГОСТ ОПТЕХИЗДАТ: 1963.
103. Чеховский Ю. В. Понижение проницаемости бетона. М., Энергия, 1968.
104. Шевченко В. И. Влияние кратковременного нагрева на сорбционные свойства и структурную пористость обычного и жаростойких бетонов.— В сб.: Технология материалов. Волгоград, ВНИИГХ, 1974.
105. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М., Стройиздат, 1979.
106. Щекин Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Киев, Будівельник, 1968.
107. Шестой Международный конгресс по химии цемента. М., Стройиздат, 1976.
108. Шумский К. П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. М., Машиностроение, 1974.
109. Юнг В. Н. Основы технологии вяжущих веществ. М., Промстройиздат, 1951.
110. Якобсон Я. М., Савалов И. Г. Краткий справочник по бетону и железобетону. М., Стройиздат, 1974.
111. Concrete Polymer Materials, 1—5 Topical Report, Division of General Research Bureau of Reclamation, Radiation Division, Brookhaven National Laboratory, USA, 1968—1973.
112. Godard P., Delmon B., Mercier J. P. J. of Appl. Pol. Sci. v. 18, 1477—1491 (1974).
113. Kumins C., Roteman I. J. Polym. Sci, 1963, A1. p. 527.
114. Lankard D. R., Shook W. B. Dimensional instability of Heated Portland Cement Past, «Ceramic Bulletin», v. 49, 1970, N 12.
115. Monning D. G., Brian B. Polymer-concrete porosity, strength. «Cement and concrete Research», Vol 1, p. 631—644, 1971.
116. Nickolson J. F. Concrete pils impregnated with asphalt for sea-water use Engineering New-Record. vol. 97, N 25, 1926.
117. Nagaraj T. S., Vismanatcha C. S., Ayengar K. T. S., Nandi U. S., Koti B. Indian Concrete journal, v. 50. N 4, 1976.
118. Polymer in concrete. Proceedings of the First International Congress on Polymers Concrete, the Construction Press, Lancaster, 1976.
119. Rio A., Cernia E. M. J. Polymer Sci. Macromol. Revs. N 9, 1974.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Введение . . . . .                                                                                             | 3   |
| Глава 1. Бетон в условиях воздействия сухого жаркого климата . . . . .                                         | 5   |
| Глава 2. Общие сведения о полимербетонах. . . . .                                                              | 11  |
| Глава 3. Основы технологии бетонополимеров. . . . .                                                            | 19  |
| Глава 4. Разработка бетонополимеров, предназначенных для применения в районах с сухим жарким климатом. . . . . | 46  |
| Глава 5. Внутреннее напряженно-деформированное состояние бетонополимера . . . . .                              | 58  |
| Глава 6. Прочность и деформативность бетонополимера при кратковременных нагрузках. . . . .                     | 70  |
| Глава 7. Деформации бетонополимера при длительном сжатии . . . . .                                             | 82  |
| Глава 8. Структура и стойкость бетонополимеров . . . . .                                                       | 95  |
| Глава 9. Применение бетонополимеров в строительстве. Техничко-экономическое обоснование . . . . .              | 108 |
| Литература . . . . .                                                                                           | 115 |

Иркин Касимович Касимов  
Владимир Михайлович Джабаров  
Юрий Васильевич Максимов  
Роман Леонидович Серых

### БЕТОНЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОНОМЕРАМИ

*Утверждено к печати*

*Ученым советом Ташкентского политехнического института  
и Научным советом Министерства высшего и среднего специального образования  
УзССР*

Редактор И. Н. Боева  
Художник Е. И. Владимиров  
Технический редактор Х. У. Бабамухамедова  
Корректор О. В. Вахнина

ИБ № 2540

Сдано в набор 30.09.82. Подписано к печати 8.12.82. P07932. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 1000. Заказ 200. Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Фан» УзССР, Ташкент, 700047, ул. Тоголя, 70  
Типография Издательства «Фан» УзССР, Ташкент, проспект М. Горького, 79.