

## **Тема 1 Введение. Общие понятия**

### **Определение бетона и бетонной смеси**

**Бетон** — это искусственный каменный материал, получаемый в результате твердения рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси вяжущего, заполнителей, затворителя и, при необходимости, химических добавок, до затвердевания такая смесь называется бетонной смесью.

### **Историческая справка и перспективы развития технологии бетона**

Бетон известен давно. В древнем Риме, например, из бетона на известке был построен ряд сложных инженерных сооружений. Существует мнение, что блоки внутренней части египетских пирамид также изготовлены из бетона, вяжущим в которых служила известь. Широкое применение бетона началось после освоения промышленного производства портландцемента.

Современное строительство немыслимо без бетона — это один самых массовых строительных материалов. Однако бетон самый сложный искусственный композиционный материал. Он может обладать совершенно уникальными свойствами и применяться в самых разных эксплуатационных условиях. Широкое использование бетона объясняется многими преимуществами его, к числу которых относятся следующие.

1. Гармоничное сочетание с окружающей средой
2. Имеет неограниченную сырьевую базу и сравнительно низкую стоимость
3. Достаточно высокая архитектурно - строительная выразительность
4. Сравнительная простота и доступность технологии
5. Возможность широкого использования местно сырья утилизации техногенных отходов
6. Широкий диапазон строительно-технических свойств изделий
7. Возможность изготовления крупноразмерных промышленных изделий.
8. Изготовление бетона и изделий из него отличается малой энергоемкостью экологической безопасностью и эксплуатационной надежностью.

Именно этому <sup>благодаря</sup> бетон <sup>без</sup> сомнения останется основным конструкционным материалом в обозримом будущем. Последние десятилетия ознаменовались значительными достижениями технологии бетона. В последние годы появились и получили широкое распространение новые эффективные вяжущие, модификаторы вяжущих и бетонов, активные минеральные добавки и наполнители, армирующие волокна, новые технологические приемы и методы получения строительных композитов. Кроме того существенно обогатились представления о структуре и свойствах бетонов, процессах структурообразования. Появилась возможность прогнозирования свойств и активного управления характеристиками получаемого материала. В последние годы успешно развивается компьютерное проектирование состава бетона. Все это позволило не только создать, но и освоить производство новых видов бетона, значительно расширить их номенклатуру

### Классификация бетонов

Классификация бетонов по ГОСТ 25192-2012 осуществляется следующим образом.

1. В зависимости от основного назначения:

- конструкционные;
- специальные (например, теплоизоляционные, радиационностойкие, декоративные).

2. По стойкости к видам коррозии:

А - бетоны, эксплуатируемые в среде без риска коррозионного воздействия (ХО);

Б - бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием карбонизации (ХС);

В - бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием хлоридов (ХД и ХС);

Г - бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием попеременного замораживания и оттаивания (ХФ);

Д - бетоны, эксплуатируемые в среде, вызывающей химическую коррозию (ХА)

(Среда эксплуатации бетона указана в соответствии с ГОСТ 31384)

3. По виду вяжущего:

- цементные; - известковые;
- шлаковые;
- гипсовые;
- специальные (например, полимербетоны, бетоны на магнезиальном вяжущем).

4. По виду заполнителей:

- плотных;
- пористых;
- специальных (например, металлическая дробь, вспененный гранулированный полистирол).

По крупности заполнителей:

- обычный бетон (содержит заполнители фракции до 5мм и фракции более 5мм);
- мелкозернистый бетон (содержит заполнители только фракции менее 5 мм);
- крупнозернистый бетон (содержит заполнители только фракции более 5 мм).

5. По структуре:

- плотной структуры;
- поризованной структуры;
- ячеистой структуры;
- крупнопористой структуры.

6. По условиям твердения:

- твердеющие в естественных условиях:
  - в нормальных условиях ( $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $\varphi \geq 95\%$ );
  - в зимних условиях (средняя  $t \leq +5^\circ\text{C}$ , либо min суточная  $t < 0^\circ\text{C}$ );
  - в условиях сухой жаркой погоды ( $t$  воздуха в тени в 12:00 более  $25^\circ\text{C}$ ,  $\varphi \leq 50\%$ )

- твердеющие в условиях тепловой обработки при атмосферном давлении;
- твердеющие в условиях тепловой обработки при давлении выше атмосферного (бетоны автоклавного твердения).

7. По прочности:

- бетоны средней прочности (класс прочности при сжатии  $B \leq B50$ );
- высокопрочные бетоны (класс прочности при сжатии  $B \geq B55$ ).

8. По скорости набора прочности в нормальных условиях твердения:

- быстротвердеющие ( $R_2/R_{28} > 0,4$ );
- медленнотвердеющие ( $R_2/R_{28} < 0,4$ );

( $R_2$  - прочность бетона в возрасте 2-х суток;  $R_{28}$  - прочность бетона в 28 суточном возрасте).

9. По средней плотности:

- особо легкие (марки по средней плотности менее D800);
- легкие (марки по средней плотности от D800 до D2000);
- тяжелые (марки по средней плотности более D2000 до D2500);
- особо тяжелые (марки по средней плотности более D2500).

10. По морозостойкости бетоны подразделяют на бетоны:

- низкой морозостойкости (марки по морозостойкости F50 и менее);
- средней морозостойкости (марки по морозостойкости более F50 до F300);
- высокой морозостойкости (марки по морозостойкости более F300).

11. По водонепроницаемости бетоны подразделяют на бетоны:

- низкой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости менее W4);
- средней водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости от W4 до W12);
- высокой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости более W12).

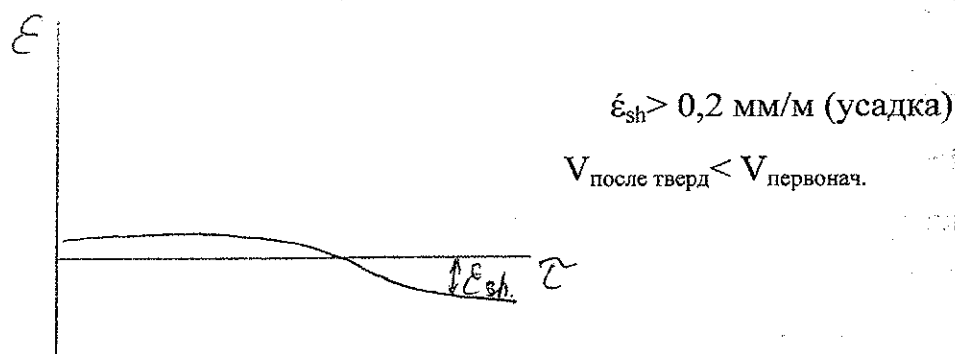
12. По истираемости бетоны подразделяют на бетоны:

- низкой истираемости (марка по истираемости G1);
- средней истираемости (марка по истираемости G2);
- высокой истираемости (марка по истираемости G3).

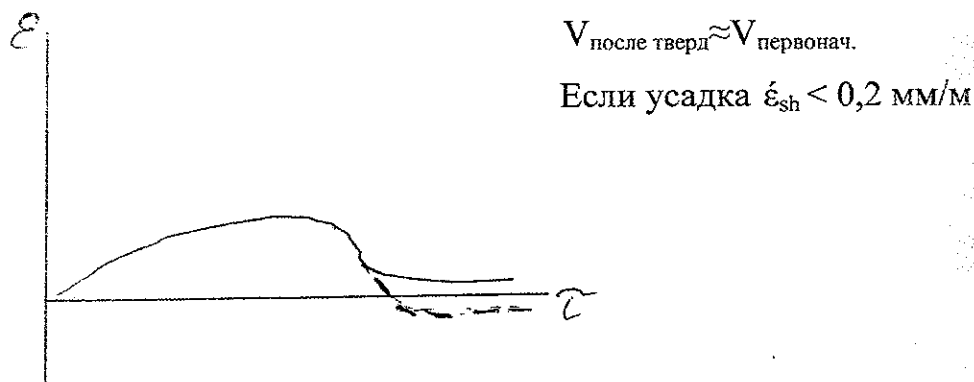
При твердении все бетоны подвергаются либо усадке, если при твердении происходит уменьшение объема по сравнению с первоначальным (деформации усадки), либо расширению, если отмечается увеличение объема (деформации расширения).

По деформациям при твердении все бетоны делятся на:

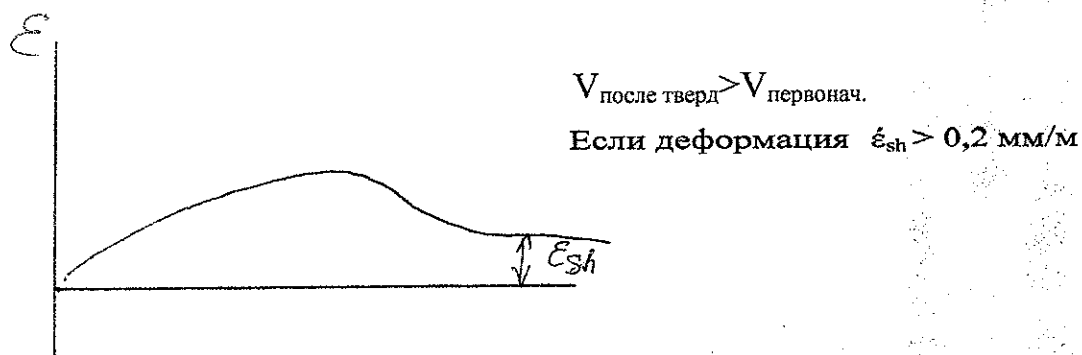
- обычные бетоны, которые при твердении дают усадку



- бетоны безусадочные



- расширяющиеся бетоны



## Тема 2. Материалы для бетона

### Вяжущие

#### Виды вяжущих

Для производства бетонных смесей и цементных бетонов используются портландцемент, шлакопортландцемент и их разновидности (быстротвердеющий, сульфатостойкий, пластифицированный, гидрофобный, пуццолановый), а также особые виды цементов (белый, цветной, расширяющийся и напугающий).

Портландцементы и шлакопортландцементы выпускают марок (300), 400, 500, 550 (600).

По содержанию активных минеральных добавок портландцементы бывают :

- бездобавочными D0, в которых не допускается содержания добавок;
- D5 с содержанием добавок до 5%;
- D20 с содержанием добавок от 5 до 20 %;
- Содержание добавок в шлакопортландцементе от 20 до 80%.

Условное обозначение цемента должно состоять из:

- наименования типа цемента (ПЦ и ШПЦ);
- марки цемента;
- обозначения максимального содержания добавок в портландцементе;
- обозначения быстротвердеющего цемента - Б;
- обозначения пластификации и гидрофобизации цемента - ПЛ, ГФ;
- обозначения цемента, полученного на основе клинкера нормированного - состава, - Н;
- обозначения действующего стандарта.

Например ПЦ -500 -Д0- Н ГОСТ 10178-85

ПЦ 400-Д20-Б - ПЛ ГОСТ 10178-85.

#### Показатели качества

1. Основным показателем качества цемента являются его прочностные характеристики — активность или марка. Прочность цемента на сжатие, определяемая испытанием половинок балочек, в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из Ц:П раствора стандартной консистенции состава 1:3 колеблется от 30 до 60 МПа (иногда выше).

Фактическое значение прочности при сжатии, полученное в результате испытания половинок балочек называется активностью цемента.

Округленное в меньшую сторону до номинального ряда значение фактической прочности в  $\text{кгс/см}^2$  называется маркой цемента (30-40 МПа марка 300, 40-50 МПа – марка 400 и т.д.).

В расчетах состава бетона желательно использовать более точное значение прочности цемента, т.е. активность, т.к. изменение прочности на 1 МПа требует изменение расхода цемента на  $3-5 \text{ кг/м}^3$ .

2. Нормальная густота является показателем водопотребности цемента. Нормальная густота портландцементов находится в пределах 22-27 % а у пуццолановых и шлакопортландцементов порядка 30%. Применение вяжущих с повышенной нормальной густотой приводит к повышению водопотребности бетонной смеси и следовательно к повышению расхода цемента (повышение на 1% НГ приводит к повышению водосодержания бетонной смеси на  $3-5 \text{ л/м}^3$ ). Поэтому целесообразно применение цементов с пониженной НГ, например пластифицированных.

3. Тонкость помола. Тонкость помола цемента характеризуется либо прохождением навески цемента через сито 008 (не менее 85%), либо удельной поверхностью, определяемой на специальных приборах (например ПСХ-2).

От тонкости помола цемента зависит его качество и, в первую очередь, прочностные характеристики. Цементы среднего качества имеют  $S_{уд}=2000-2500 \text{ см}^2/\text{г}$ , а цементы с  $S_{уд}=3000$  и более  $\text{см}^2/\text{г}$  относятся к высококачественным вяжущим.

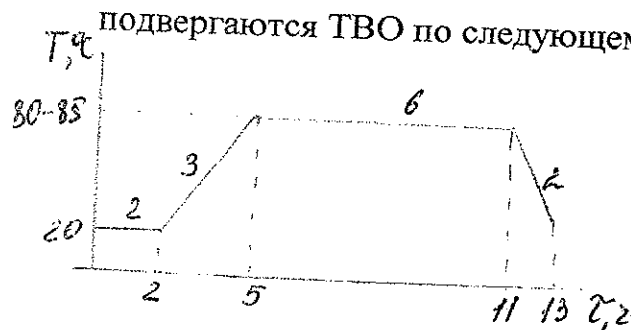
4. Сроки схватывания. Сроки схватывания цемента по ГОСТу должны находится в пределах от 45 мин. до 10 часов. В действительности НС составляет 1-2 часа, КС в пределах 5-8 часов.

~~Иногда из-за неправильно отдозированного~~ Иногда при помоле горячего клинкера температура цемента составляет более  $150^\circ\text{C}$  и двухводный гипс, вводимого в его состав для регулирования сроков схватывания, дегидратирует, т.е. образуется полуводный гипс. При затворении такого цемента

происходит быстрая гидратация полуводного гипса и наблюдается преждевременное загустевание цементного теста, называемое ложным схватыванием, которое обычно при дальнейшем перемешивании исчезает.

Сроки схватывания обеспечивают возможность производства бетонных работ, т.е. транспортирование, укладку и уплотнение бетонных смесей до их схватывания. Сроки схватывания цемента можно регулировать путем введения различных добавок в бетонную смесь.

5. Коэффициент эффективности при пропаривании. Активность цемента определяется в возрасте 28 сут при нормальном твердении. Активность цемента при пропаривании определяется по той же методике но образцы подвергаются ТВО по следующему режиму  $T_{\text{тво}}=2+(3+6+2)$ . Температура



изотермической выдержки 80-85 °C, остывание образцов в течение 2 часов до  $t=40-45^{\circ}\text{C}$ . Затем образцы испытывают по стандартной методике.

Коэффициент эффективности при пропаривании вычисляют по следующей формуле:

$$K_{\text{мп}} = R_{\text{ц}}^{\text{ТВО}} / R_{\text{ц}}^{28}$$

Где  $R_{\text{ц}}^{28}$  — активность цемента при нормальном твердении, МПа;

$R_{\text{ц}}^{\text{ТВО}}$  — активность цемента после тепловой обработки, МПа;

$K_{\text{мп}}$  — коэффициент эффективности при пропаривании.

В зависимости от величины коэффициента эффективности все цементы делятся на группы:

1 группа — высокоэффективные  $K_{\text{мп}} \geq 0,67$ ;

2 группа — среднеэффективные  $0,56 < K_{\text{мп}} < 0,67$ ;

3 группа — низкоэффективные  $K_{\text{мп}} < 0,56$

Для производства сборных железобетонных конструкций рекомендовано использование цементов 1-й и 2-й групп.



## *Роль вещественного состава цемента и минералогического состава клинкера*

В результате обжига шихты образуются клинкерные минералы, основными из них являются следующие.

Трехкальциевый силикат или алит  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ). Составляет 37-60%. Он оказывает основное влияние на качество цемента. Цемент с высоким содержанием алита отличается высокой скоростью твердения и прочностью.

Двухкальциевый силикат или белит  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Составляет 15-37%. Медленно твердеющее вяжущее, с невысокой прочностью, отличается значительной усадкой. Однако прочность их нарастает в течении длительного времени.

Трехкальциевый алюминат  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ). Составляет 5-15%. Быстро твердеет, но имеет неустойчивую рыхлую структуру с низкой прочностью, практически не участвует в формировании прочности, отрицательно влияет на морозо- и сульфатостойкость. Для бетона дорожных и аэродромных покрытий, железобетонных напорных и безнапорных труб, железобетонных шпал, мостовых конструкций, стоек опор ЛЭП применяется цемент из клинкера с нормированным составом с содержанием трехкальцевого алюмината ( $\text{C}_3\text{A}$ ) в количестве не более 8% по массе. Содержание ( $\text{C}_3\text{A}$ ) в сульфатостойком цементе ограничивается 5%.

Четырехкальциевый алюмоферрит  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Составляет 10-18%. Чем больше его содержание в цементе, тем меньше усадка.

Повышенное содержание щелочных оксидов  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  оказывают положительное влияние на эффективность цемента при пропаривании, но понижают морозостойкость цементного камня и следовательно бетона.

Очень важно, чтобы цементы выдерживали испытание на равномерность изменения объема, влияние на это оказывает наличие оксида магния ( $\text{MgO}$ ), содержание которого в цементе не должно превышать 5%.

Содержание ангидрита серной кислоты ( $\text{SO}_3$ ) в соответствии с содержанием  $\text{C}_3\text{A}$  должно быть 1-4%. Это оказывает влияние на долговечность конструкций.

Для изготовления ответственных конструкций, работающих в агрессивных средах рекомендовано использование бездобавочных цементов.

### **Крупный заполнитель**

В качестве крупного заполнителя может быть использован щебень или гравий. Гравий — это природный материал, образованный в результате выветривания и имеет окатанную форму. Щебень образуется в результате дробления горных пород и имеет не окатанную шероховатую поверхность. Щебень имеет хорошее сцепление с цементным камнем и является заполнителем более высокого качества и может применяться для всех бетонов. Гравий имеет ограниченное применение, имеет более низкую водопотребность по сравнению с гравием. *щебнем*

Заполнитель характеризуется маркой по прочности. Чем выше прочность заполнителя, тем более высокая прочность бетона может быть получена на этом заполнителе. Прочность заполнителя должна быть выше предполагаемой прочности бетона желательно в 2 раза (минимум на 20%).

Марка заполнителя по морозостойкости должна быть не ниже предполагаемой марки по морозостойкости бетона.

Рекомендовано применение в бетонах щебня в виде отдельных фракций (5-10 мм, 10-20 мм, 20-40 мм).

Щебень должен быть чистым, содержание ПГЧ не должно превышать 3%. Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы не должно превышать 35%.

### *Мелкий заполнитель*

В качестве мелкого заполнителя используется песок, представляющий собой рыхлую смесь зерен материала природного или искусственного происхождения с размером 0,16 – 5 мм.

В соответствии с ГОСТ 8736 песок разделен на группы по крупности в зависимости от показателя модуля крупности и полного остатка на сите 0,63.

Для приготовления бетонных смесей рекомендовано применение пека не мельче среднего ( $M_k$  не ниже 2,0, полный остаток на сите 0,63 не ниже 30%, содержание зерен менее 0,16 мм не должно превышать 15%).

Песок должен быть чистым. Содержание ПГЧ не более 3%, собственно глины не более 0,5%. Не должно содержаться органических примесей, оказывающих отрицательное влияние на гидратацию цемента.

### *Вода затворения*

ГОСТ разрешает применять только водопроводную питьевую воду. Остальная вода должна пройти проверку на наличие ионов  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$ .

### *Добавки для бетонов*

Добавки для бетонов – это *природные* или *искусственные* химические продукты, вводимые в составы бетонов и растворов с целью улучшения технологических свойств бетонных и растворных смесей, физико-химических свойств бетонов, повышения качества и конкурентоспособности продукции и, иногда, снижения их стоимости.

К природным добавкам относятся тонкодисперсные или тонкомолотые (до тонкости помола цемента) минеральные добавки, которые бывают:

- неактивные (инертные) - добавки-наполнители, играющие только микро-наполняющую роль;
- активные – добавки заменители части цемента, обладающие самостоятельной или скрытой активностью (способностью встать в химические реакции);

- минеральные пластифицирующие добавки

Химические добавки, применяемые для модифицирования свойств бетонных и растворных смесей, бетонов и растворов, в зависимости от основного эффекта действия в соответствии с ГОСТ 24211-2003 подразделяют на виды:

1. Регулирующие свойства готовых к употреблению бетонных и растворных смесей:

*пластифицирующие-водоредуцирующие* — повышающие подвижность, снижающие водопотребность растворных и бетонных смесей:

- суперпластифицирующие;

- высокопластифицирующие;

*пластифицирующие;*

*Стабилизирующие* - Снижение расщепления и водоотделения тяжелой бетонной смеси;

*регулирующие сохраняемость подвижности* - увеличивающие или снижающие время сохраняемости первоначальной подвижности смеси;

*порирующие* — обеспечивающие увеличение объема воздуха или газа в растворных и бетонных смесях различного назначения:

- воздухововлекающие;

- пенообразующие;

- газообразующие.

2. Изменяющие свойства бетонов и растворов:

*регулирующие кинетику твердения* — ускоряющие или замедляющие нарастание прочности:

- ускорители;

- замедлители;

*повышающие прочность* — способствующие увеличению прочности в проектом возрасте;

*снижающие проницаемость* — применяются для повышения марки по водонепроницаемости;

повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре – обеспечивающие повышение пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре;

повышающие морозостойкость - повышающие стойкость в условиях многократного переменного замораживания и оттаивания;

повышающие коррозионную стойкость;

регулирующие процессы усадки и расширения – способствующие снижению деформаций усадки и обеспечению деформаций расширения.

### 3 Придающие бетонам и растворам специальные свойства:

Противоморозные - обеспечивающие твердение при отрицательных температурах;

Гидрофобизирующие - обеспечивающие снижение водопоглощения;

биоцидные;

повышающие стойкость к высолообразованию.

### Тема 3 Бетонные смеси

Процесс изготовления и твердения бетона состоит из двух стадий. 1 стадия — до схватывания цемента и превращения бетона в твердое тело — бетонная смесь. И 2 стадия — это период твердения и эксплуатации материала, обладающего свойствами твердого тела — бетон.

Бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную полидисперсную систему, полученную при затворении водой смеси цемента и заполнителей.

#### Реологические свойства бетонной смеси

Наиболее важным свойством бетонной смеси является удобоукладываемость или формуемость, т. е. способность смеси растекаться и принимать заданную форму, сохраняя связность и однородность.

Бетонную смесь, благодаря наличию внутренних сил взаимодействия между дисперсными частицами твердой фазы и воды, можно рассматривать как структурированную систему, с определенными реологическими характеристиками. Бетонная смесь обладает связностью, т.е. способностью растекаться без нарушения сплошности.

Основным структурообразующим компонентом бетонной смеси является цементное тесто, которое обуславливает реологические характеристики бетонной смеси: структурную вязкость, предельное напряжение сдвига и период релаксации.

1. Структурная вязкость. Бетонная смесь как структурированная система обладает некоторой начальной прочностью структуры или структурной вязкостью  $\eta = \eta_0$ . В цементном тесте структура создается за счет действия сил молекулярного сцепления между частицами, окаймленными тонкими пленками воды. Пленки жидкой фазы создают непрерывную пространственную сетку в структуре цементного теста, придавая бетонной смеси в целом свойство пластичности и обеспечивая создание сплошной среды.

2. Предельное напряжение сдвига. Если вязкость жидкости является постоянной, то вязкость структурированных систем может изменяться на 2-3 порядка в зависимости от величины напряжения сдвига системы  $\tau$  или скорости сдвиговых деформаций. Величина сдвигового напряжения, при которой происходит предельное разрушение начальной структуры бетонной смеси, называется предельным напряжением сдвига  $\tau_0$ .

3. Период релаксации. Под воздействием внешних сил например в результате вибрации происходит разрыхление первоначальной структуры, ослабляются связи между ее отдельными элементами, в результате возрастает способность системы к деформациям, преодолевается предельное напряжение сдвига, система переходит в состояние пластично — вязкого течения, увеличивается ее подвижность. После окончания их действия восстанавливается начальная структурная прочность смеси. Это явление получило название тиксотропии.

На способности бетонной смеси к тиксотропному разжижению основан принцип виброуплотнения бетонных смесей. На первом этапе виброуплотнения происходит разрушение первоначальной структуры бетонной смеси, в которой действуют силы тяжести, силы внутреннего трения и сцепления. Под действием вибрации частицы бетонной смеси меняют взаимное расположение, перемещаются, контакты между ними разрушаются и смеси переходит в состояние тяжелой жидкости, в которой проявляются силы тяжести. Под действием сил тяжести образуется новая более устойчивая структура.

На втором этапе достигается компактное расположение частиц, они входят в плотное зацепление друг с другом. Далее бетонная смесь вибрируется как единое целое.

Время в течение которого бетонная смесь переходит в стабильное состояние называется периодом релаксации.

## ***Влияние на реологические свойства различных факторов***

На реологические характеристики бетонных смесей оказывают влияние свойства материалов и их количество в смеси.

1 В большой степени на свойства бетонных смесей влияют реологические характеристики цементного теста, которые определяются видом вяжущего, тонкостью помола, нормальной густотой цементного теста и количеством цементного теста определенного состава в единице объема бетонной смеси.

2 Свойства заполнителей – зерновой состав, пустотность, состояние поверхности зерен, водопотребность заполнителей, а также соотношение между песком и щебнем – оказывают значительное влияние на свойства бетонных смесей.

3 С увеличением содержания цементного теста при постоянном В/Ц или с уменьшением количества заполнителей снижаются вязкость и предельные напряжения сдвига. Изменение водосодержания бетонной смеси – главный фактор, с помощью которого регулируют реологические характеристики бетонных смесей.

4 Структурную вязкость можно значительно уменьшить за счет введения в бетонную смесь добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) с различным механизмом действия.

Для определения реологических характеристик используются специальные вискозиметры. Подобные испытания выполняют в основном в научно-исследовательских лабораториях. В производственных условиях применяются иные способы контроля удобоукладываемости бетонной смеси.

### **Удобоукладываемость бетонной смеси**

Одним из основных технологических критериев бетонной смеси является ее удобоукладываемость, соответствующая принятому способу формирования.



В производственных условиях удобоукладываемость оценивается либо подвижностью, выраженной ОК в см (для пластичных смесей), либо распылом конуса РК в см (для самоуплотняющихся смесей), либо жесткостью Ж в с (для непластичных смесей).

Таблица 1 - Марки по распылу конуса\*

| Марка | Распыл конуса, см |
|-------|-------------------|
| P1    | Менее 35          |
| P2    | 35-41             |
| P3    | 42-48             |
| P4    | 49-55             |
| P5    | 56-62             |
| P6    | Более 62          |

Таблица 2 - Марки по осадке конуса

| Марка | Осадка конуса, см |
|-------|-------------------|
| П1    | 1-4               |
| П2    | 5-9               |
| П3    | 10-15             |
| П4    | 16-20             |
| П5    | Более 20          |

Таблица 3 - Марки по жесткости

| Марка | Жесткость, с |
|-------|--------------|
| Ж1    | 5-10         |
| Ж2    | 11-20        |
| Ж3    | 21-30        |
| Ж4    | 31-50        |
| Ж5    | Более 50     |

Таблица 4 - Марки по уплотнению\*\*

| Марка | Коэффициент уплотнения |
|-------|------------------------|
| КУ1   | Более 1,45             |
| КУ2   | 1,45-1,26              |
| КУ3   | 1,25-1,11              |
| КУ4   | 1,10-1,04              |
| КУ5   | Менее 1,04             |

Для оценки показателя подвижности производится измерение осадки конуса (ОК, см) с использованием стандартного конуса Абрамса.

Для определения марки по жесткости используется специальный прибор для определения жесткости (Вебе). Показателем жесткости является время в сек., необходимое для достижения бетонной смеси определенной степени уплотнения по стандартному режиму ( $I=300 \text{ см}^2/\text{с}^3$  при  $n = 2900$  кол/мин,  $A = 0,5$  мм).

Марка бетонной смеси по распылу конуса определяется по диаметру расплава бетонной смеси на специальном встряхивающем столе, отформованном в стандартном конусе высотой 200 мм и диаметрами 200 и 130 мм.

Марки бетонной смеси по уплотнению определяются оценкой разности высот бетонной смеси в форме квадратного сечения размером 200x200x400 мм до и после ее уплотнения.

$C=h_1/h_2$  ( $h_1$  – высота формы,  $h_2$  – высота бетонной смеси в форме после уплотнения).

## Сохраняемость удобоукладываемости

Удобоукладываемость бетонных смесей, поставляемых заказчику, контролируют на заводе-изготовителе сразу после приготовления и у места укладки. Бетонная смесь во времени теряет подвижность и увеличивает жесткость по сравнению с исходной.

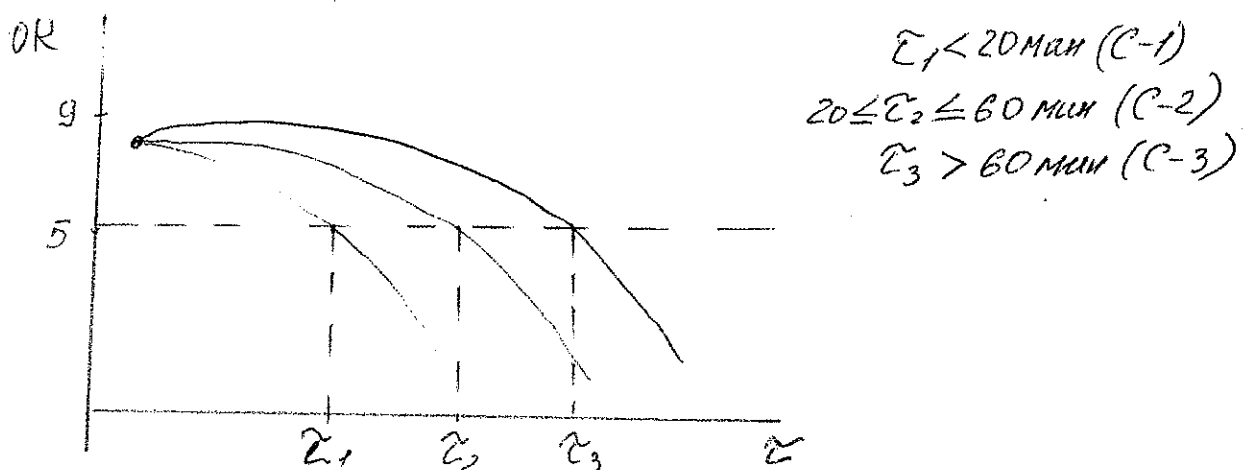
При определении сохраняемости свойств бетонной смеси первое испытание следует выполнять непосредственно после окончания перемешивания ее компонентов (не позднее 10 мин), а второе и последующие - через каждые 30 мин после первого испытания.

В зависимости от сохраняемости бетонные смеси делят на три класса:

С-1 - низкой сохраняемости (менее 20 мин); этот класс характерен для смесей с повышенной температурой, смесей, содержащих добавки-ускорители, а также для смесей с низким значением В/Ц;

С-2 - средней сохраняемости (21-60 мин); этот класс характерен для нормально схватывающихся цементов и смесей со средними значениями указанных факторов;

С-3 - высокой сохраняемости (более 60 мин); этот класс характерен для медленно схватывающихся цементов, смесей с пониженной температурой, смесей с добавками -замедлителями схватывания, а также для смесей с повышенным значением В/Ц.



Класс бетонной смеси по сохраняемости должен быть указан в маркировке (условном обозначении) товарных бетонных смесей.

Степень потери подвижности и повышения жесткости бетонной смеси - сохраняемость ее свойств во времени - зависят от многих факторов: свойств це-

мента (НСхв, КСхв), состава бетонной смеси (наличие добавок), температуры смеси и окружающего воздуха.

При приготовлении бетонных смесей иногда обнаруживается ложное схватывание, выражающееся в быстром загустевании смеси. Ложное схватывание является проявлением аномального свойства цемента некоторых партий. Оно может быть устранено повторным перемешиванием бетонной смеси без добавления воды.

### **Расслаиваемость бетонной смеси**

Может наблюдаться при транспортировании и уплотнении бетонной смеси. Расслоение оценивают показателями раствоороотделения и водоотделения.

*Раствоороотделение* бетонной смеси. При динамическом воздействии крупный заполнитель, плотность которого отличается от плотности растворной части, перемещается в бетонной смеси и может либо оседать (плотный заполнитель), либо всплывать (пористый заполнитель).

Определяют путем сопоставления содержания растворной составляющей в нижней и верхней частях бетонной смеси, уплотненной в мерном сосуде или форме для изготовления контрольных образцов бетона.

*Водоотделение.* При транспортировании, укладке и уплотнении составляющие бетонной смеси сближаются, а часть воды, как наиболее легкого компонента отжимается вверх (внешнее водоотделение), при этом образуются капиллярные ходы и полости под зернами крупного заполнителя (внутреннее водоотделение). Это явление называется *седиментацией* бетонной смеси.

Водоотделение бетонной смеси определяют после ее отстаивания в мерном сосуде или форме в течение определенного промежутка времени.

Все это нарушает структуру бетонной смеси, а в последствии и бетона, делает ее неоднородной.

## Условное обозначение бетонной смеси

В соответствии с ГОСТ 7473-2012 бетонные смеси при заказе могут быть следующих видов.

**Бетонная смесь заданного качества:** Бетонная смесь, требуемые свойства и дополнительные характеристики которой задаются производителю, несущему ответственность за обеспечение этих требуемых свойств и дополнительных характеристик.

**Бетонная смесь заданного состава:** Бетонная смесь, состав которой и используемые при ее приготовлении составляющие задаются производителю, несущему ответственность за обеспечение этого состава.

**Бетонная смесь заданного нормированного состава:** Бетонная смесь заданного состава, который определен конкретным стандартом или техническим документом, например, производственными нормами.

По типу бетона бетонные смеси подразделяют на:

- бетонные смеси тяжелого бетона (БСТ);
- бетонные смеси мелкозернистого бетона (БСМ);
- бетонные смеси легкого бетона (БСЛ).

Условное обозначение бетонной смеси заданного качества при заказе должно состоять из сокращенного обозначения бетонной смеси в соответствии, класса бетона по прочности, марки бетонной смеси по удобоукладываемости и, при необходимости, других нормируемых показателей качества, например, марки по морозостойкости, марки по водонепроницаемости, средней плотности бетона и др., и обозначения действующего стандарта.

### Примеры условных обозначений

Бетонная смесь тяжелого бетона класса по прочности на сжатие *B25*, марки по удобоукладываемости *П1*, марок бетона по морозостойкости *F200* и водонепроницаемости *W4*:

*БСТ B25 П1 F200 W4 ГОСТ 7473-2010;*

То же бетонная смесь мелкозернистого бетона:

*БСМ B25 П1 F200 W4 ГОСТ 7473-2010;*

То же бетонной смеси легкого бетона класса по прочности на сжатие  $B_{12,5}$ , марки по удобоукладываемости П2, марок бетона по морозостойкости  $F_{200}$ , водонепроницаемости  $W_2$ , средней плотности  $D_{900}$ :

*БСЛ  $B_{12,5}$  П2  $F_{200}$   $W_2$   $D_{900}$  ГОСТ 7473-2010*

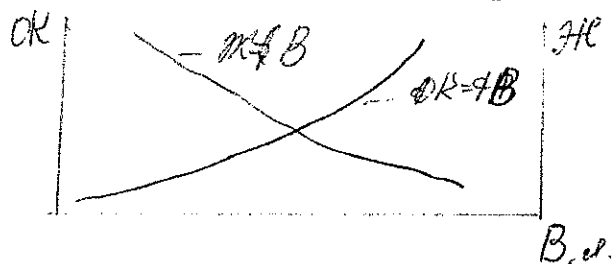
При заказе товарной бетонной смеси заданного качества потребитель должен указывать требования к прочности бетона по проектному классу ( $B, B_b, B_{tb}, B_{tt}$ ) и, при необходимости, по минимальной средней прочности бетона в каждой поставляемой партии ( $R_m$ ), а требования по удобоукладываемости - по маркам и, при необходимости, по конкретным значениям.

Например: бетонная смесь тяжелого бетона класса по прочности на сжатие  $B_{25}$  с минимальной требуемой прочностью бетона 33 МПа, марки по удобоукладываемости П1, с осадкой конуса 3 см, марок бетона по морозостойкости  $F_{200}$  и водонепроницаемости  $W_4$ :

*БСТ  $B_{25}$  ( $R_m \geq 33$  МПа) П1 (ОК 3 см)  $F_{200}$   $W_4$  ГОСТ 7473-2010*

### Факторы, влияющие на удобоукладываемость бетонной смеси

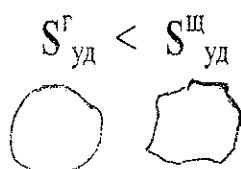
1. Количество воды затворения. Смеси с большим количеством



воды затворения обладают более высокой подвижностью и меньшей жесткостью.

2. Вид вяжущего, его водопотребность. При равных условиях бетонные смеси, приготовленные на цементах с меньшей нормальной густотой, более подвижны.

3. Вид заполнителя Заполнители с меньшей водопотребностью



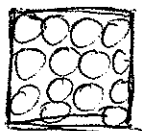
обеспечивают лучшую удобоукладываемость бетонной смеси.

Бетонные смеси, приготовленные на гравии и речном песке при прочих равных условиях обладают лучшей удобоукладываемостью, по сравнению с

бетонными смесями на щебне и горном песке, т.к. заполнители, имеющие окатанную форму зерен, обладают меньшей удельной поверхностью, следовательно меньшей водопотребностью (для смачивания меньшей поверхности требуется меньше воды).

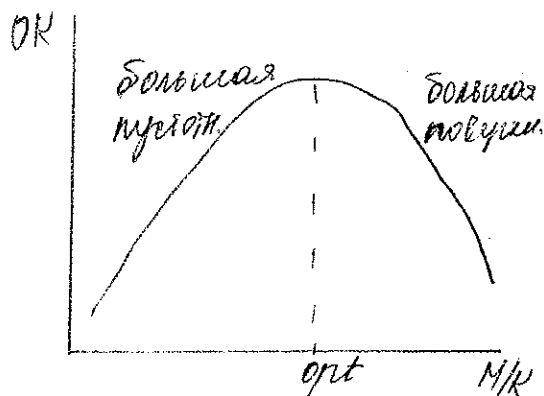
#### 4 Наибольшая крупность заполнителя. С увеличением среднего

$$\Sigma S_{уд} < \Sigma S_{уд} < \Sigma S_{уд}$$



диаметра зерен заполнителей уменьшается их суммарная удельная поверхность и требуемая удобоукладываемость достигается при меньшем водо-  
содержании.

#### 5 Соотношение между мелким и крупным заполнителями (М/К).



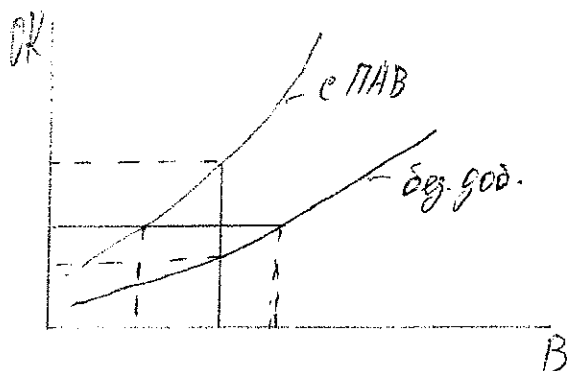
Лучшую удобоукладываемость получают при М/К, обеспечивающем оптимальное сочетание пустотности и поверхности.

Если в смеси заполнителей недостаточное количество мелкой фракции, требуемой для заполнения межзерновой пустотности крупного заполнителя, то такая смесь не будет обладать достаточной удобоукладываемостью.

Если в смеси заполнителя будет избыток мелкой фракции, то такой заполнитель обладает большей водопотребностью, т.к. возрастает поверхность смачивания и это приводит к снижению удобоукладываемости.

6 Количество цементного теста. Увеличение количества цементного теста с постоянным В/Ц приводит к улучшению удобоукладываемости.

#### 7 Добавки ПАВ. Введение пластифицирующих добавок ПАВ в бе-



тонную смесь снижает ее водопотребность, что при одинаковом водосодержании позволяет получить лучше укладываемые смеси.

#### **Тема 4. Показатели качества бетона**

В соответствии с ГОСТ 26633 к бетону предъявляются требования:

- по прочности на сжатие в проектном возрасте  $B$ ;
- по прочности на осевое растяжение  $B_t$ ;
- по прочности на растяжение при изгибе  $B_{th}$ ;
- по средней плотности  $D$ ;
- по морозостойкости  $F$ ;
- по водонепроницаемости  $W$
- по истираемости  $G$

#### **Прочность бетона при сжатии**

Прочность является основным показателем качества бетонов общего назначения.

Прочность определяется посредством испытания серии образцов, специально изготовленных или выбуренных из конструкции. Минимальное количество образцов – 3 шт. Испытание производится на гидравлическом прессе, в результате определяется нагрузка. Предел прочности при сжатии вычисляется по формуле:

$$R_t = \frac{F}{A}$$

Затем вычисляют среднее значение из двух наибольших значений прочности.

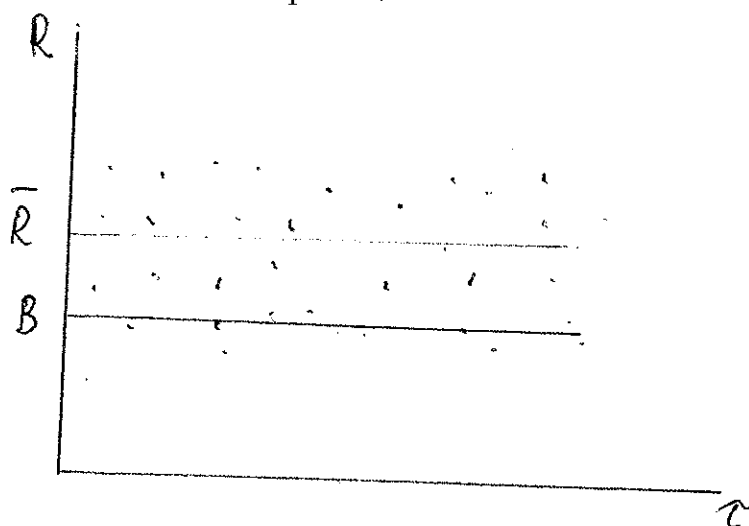
Зависит от прочности на сжатие цементного камня, от прочности заполнителей и прочности сцепления заполнителя с цементным камнем.

#### **Класс бетона по прочности**

Класс бетона по прочности является основным нормируемым показателем качества бетона. По ГОСТ 26633 классы В3,5 – В100, по СНиП 52-01-2003 от В0,5 – В120 (цифра после буквы показывает гарантированное значение прочности в МПа).

Классы бетона определяются по результатам испытания стандартных контрольных образцов, через 28 суток нормального твердения (при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха не менее 90%).

Бетон характеризуется неоднородностью структуры, изменчивостью свойств материалов, колебаниями параметров технологических процессов, влиянием неучтенных факторов (износ оборудования, температура, влажность окружающей среды, погрешностей при испытаниях и т.д.). Все это приводит к неоднородности его свойств. На этом основании показатели свойств бетона можно считать величинами случайными, т.е. при испытании образцов одного и того же материала мы получаем разные значения, которые не можем предсказать заранее.



Для оценки случайных величин используются статистические характеристики: среднее арифметическое -  $\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n}$

среднеквадратическое отклонение -  $S_R = \sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n-1}}$

и коэффициент вариации -  $\nu = \frac{S_R}{\bar{R}}$

где  $R_i$  — прочность  $i$ -го образца;

$n$  — количество образцов;

Последние две характеристики  $S$  и  $\nu$  используются для оценки однородности свойств бетона и зависят от разброса, т.е. отклонения данных от среднего значения. Чем больше разброс данных относительно среднего, тем больше значения  $S$  и  $\nu$ , тем меньше однородность бетона.

**Класс бетона по прочности** — это гарантированное с обеспеченностью 0,95 значение прочности за контролируемый период, приведенное к номи-



*Это означает,*  
нальному ряду ~~и~~ что прочность бетона при большом числе испытаний в 95% случаев будет равна или больше гарантированной, а в 5% - меньше.

Класс бетона и средний контролируемый уровень прочности  $\bar{R}$ , при которой будет обеспечена гарантированная прочность, связаны зависимостью:

$$B = \bar{R}(1 - tv),$$

где  $t$  – статистический критерий, который при 95% обеспеченности равен  $t = 1,64$ .

Значение коэффициента вариации определяется при статистическом контроле прочности на предприятии, а при отсутствии данных принимается равным среднеотраслевому значению равному 13,5% (0,135). При этом средняя прочность составит:

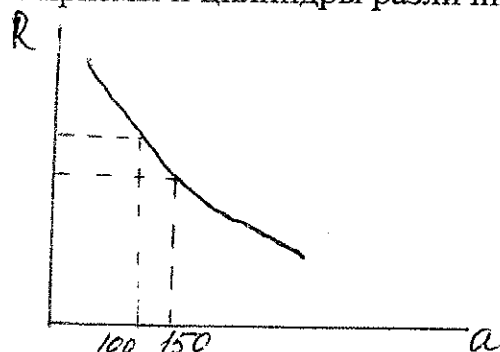
$$\bar{R} = \frac{B}{1 - tv} = \frac{B}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = \frac{B}{0,778}.$$

Именно величина среднего контролируемого уровня прочности используется при подборе состава бетона

### ***Зависимость предела прочности от размера образцов***

При испытании на сжатие могут быть использованы образцы кубы с размером ребра ( $a$ ) 70,7 мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм, 300 мм ( $a \geq 4D_{\max}$ ), а также призмы и цилиндры различных размеров. За базовый образец принят куб с размером ребра 150 мм.

Прочность, полученная в результате испытания образцов других форм и размеров, приводится к базовой с помощью масштабных коэффициентов.



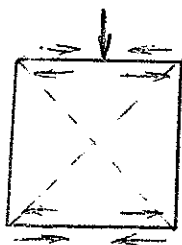
$$[R]_{150} = k \cdot R_{ai}; \text{ для } a = 100 \text{ мм} - k = 0,95$$

## Влияние геометрии образца на значение прочности

$R, R_k (R_c)$  – кубиковая прочность

$R_{пр} (R_{pr})$  – призмная прочность

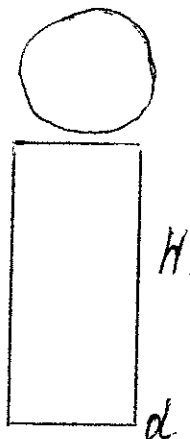
$R_{ц} (R_{cil})$  – цилиндровая прочность



кубиковая прочность  
для производства



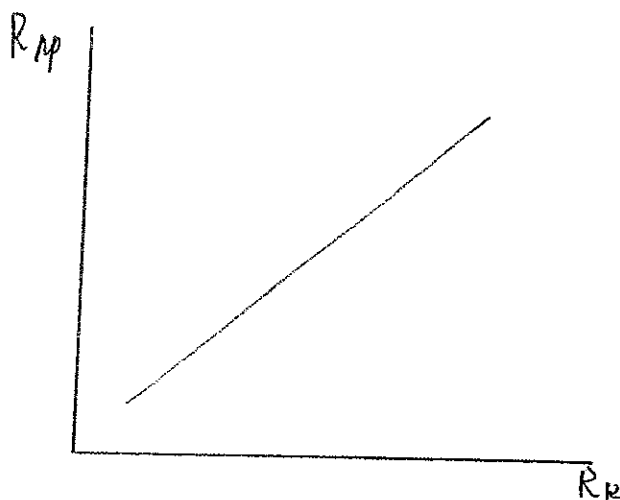
призмная прочность  
для конструкций



$$\frac{H}{d} = 2$$

Особенностью бетона под нагрузкой является то, что при сжатии он разрушается от растягивающих напряжений в направлении перпендикулярном действию сжимающих усилий. В тоже время между поверхностями плиты пресса и рабочими поверхностями образцов действуют силы трения в обратном направлении растягивающим усилиям. И вблизи поверхности соприкосновения преобладают силы трения, а по мере удаления от нее - растягивающие усилия.

Поэтому призма дает более реальные значения прочности при сжатии.



$$K_{пр} = \frac{R_{пр}}{R_k}$$

$K_{пр}$  – есть величина постоянная

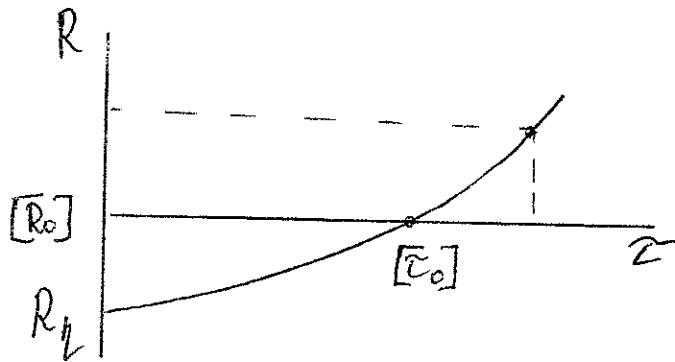
$$R_{пр} = 0,783 R_k$$

Между образцами-цилиндрами и кубиками существует зависимость

$R_{ц} = 0,8 R_k$ , т.е между прочностью цилиндра и призмы можно поставить знак « $\approx$ » (разница составляет  $\approx 7\%$ ).

### Влияние скорости нагружения на значение прочности

$d\sigma/dt$  – скорость приложения нагрузки



Стандартная скорость приложения нагрузки 0,2 – 0,8 МПа/с с общим временем испытания не менее 30 с ( $\tau \geq 30$  с).

Если скорость нагружения возрастает, то возрастает и значение прочности. Повышение прочности при увеличении скорости нагружения называется динамическим упрочнением. Коэффициент динамического упрочнения рассчитывается, как отношение прочности при быстром приложении нагрузки к стандартной:

$$k_d = \frac{R_d}{[R]_0} = 1,05 \dots 2,5$$

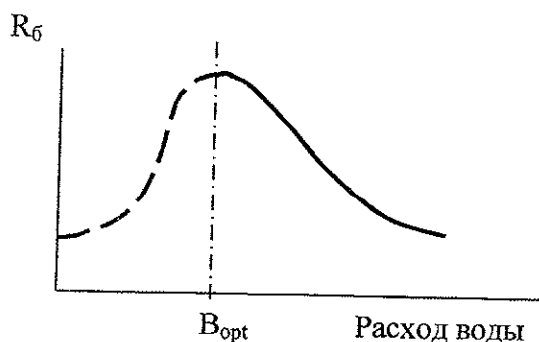
Значение коэффициента зависит от влажности образца. Чем выше влажность, тем выше значение коэффициента динамического упрочнения.

### Основной закон прочности бетона

Экспериментальными исследованиями установлено, что прочность бетона главным образом определяется отношением массы воды к массе цемента (водоцементным отношением), качеством заполнителей и активностью цемента.

Для получения удобоукладываемых бетонных смесей принимают водоцементное отношение  $В/Ц = 0,4 \dots 0,7$ , то есть расход воды составляет 40...70% в то время, как для полной гидратации цемента необходимо около 22% воды от массы цемента. Избыточная вода, испаряясь образует в бетоне поры и капилляры различной формы и размеров. Это влечет за собой сниже-

ние прочности бетона. Зависимость  $R_b=f(B)$  при  $Ц = \text{const}$  имеет следующий вид



Левый (восходящий) участок соответствует изменению прочности неудобоукладываемых бетонных смесей. Недоуплотнение бетонной смеси приводит к образованию в бетоне крупных воздушных пустот, неплотностей, снижающих прочность бетона. По мере увеличения количества воды, удобоукладываемость бетонных смесей улучшается. Максимальное значение прочности достигается при оптимальном количестве воды, при котором достигается максимальная плотность свежееуложенной смеси при данном способе уплотнения.

Увеличение расхода воды сверх оптимального приводит к образованию в бетоне большого количества капиллярных пор, что приводит к снижению прочности бетона (правый нисходящий участок кривой).

Выявлены количественные связи между показателями прочности и основными факторами, которые описываются различными эмпирическими формулами.

Более удобной для применения на практике является формула, выведенная швейцарским ученым И. Боломеем, усовершенствованная Б.Г. Скрамтаевым. Функция  $R_b=f(Ц/B)$ , может быть представлена линейным уравнением, называемым формулой Боломея-Скрамтаева:

$$R_b = AR_{ц} (Ц/B \pm B),$$

где  $A$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей и особенности состава бетона;

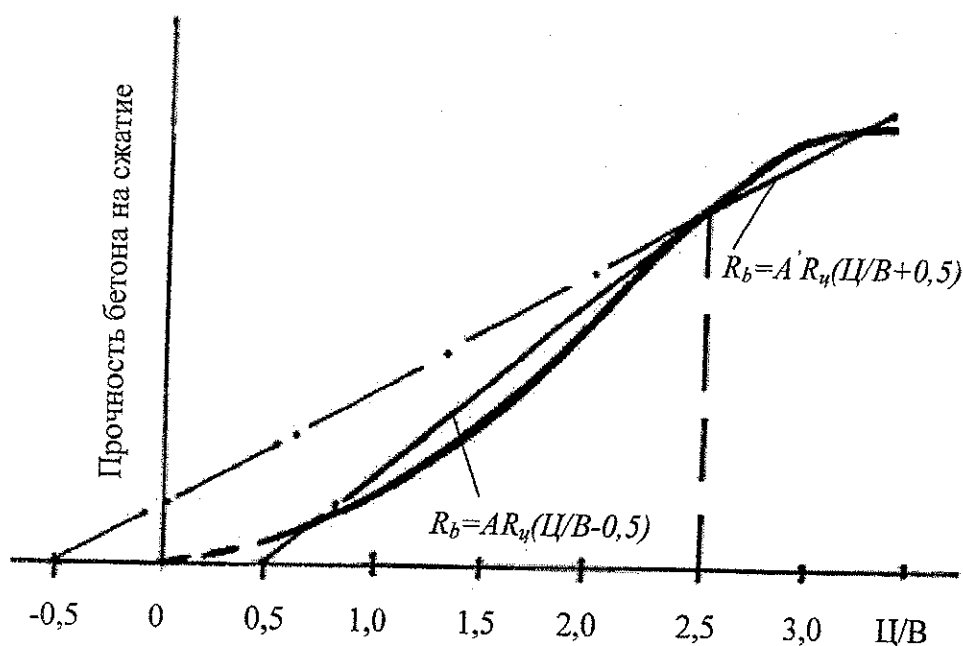
$R_{ц}$  – активность цемента, МПа;

$Ц$  – расход цемента в бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$В$  – расход воды в бетонной смеси, л/м<sup>3</sup>;

$Б$  – эмпирический коэффициент, определяемый опытным путем.

Эмпирическая зависимость  $R_b=f(Ц/В)$ , построенная по результатам многочисленных опытных данных, описывается кривой сложного очертания, имеющей точку перегиба при  $Ц/В$  равном примерно 2,5.



Такой характер изменения прочности от цементно-водного отношения можно описать двумя уравнениями:

$$R_b = A R_{ц} (Ц/В - Б) \text{ при } Ц/В \leq 2,5;$$

$$R_b = A' R_{ц} (Ц/В + Б) \text{ при } Ц/В > 2,5$$

Графически эти уравнения представлены отрезками прямых, называемых линиями сглаживания экспериментальных данных, имеющих разные углы наклона к оси абсцисс  $\phi$  и  $\phi'$  соответственно. Углы наклона зависят от многих факторов, в частности от активности цемента и качества заполнителей. Активность цемента учитывается в уравнении прочности, как абсолют-

ная величина, а качество заполнителей и особенности состава бетона учитываются с помощью коэффициентов  $A$  и  $A'$ , которые представляют собой тангенс угла наклона линии сглаживания к оси Ц/В. В данных уравнениях значение коэффициента  $B$ , определенное по статистическим данным, численно равно 0,5, значения коэффициентов  $A$  и  $A'$  определяются по таблицам.

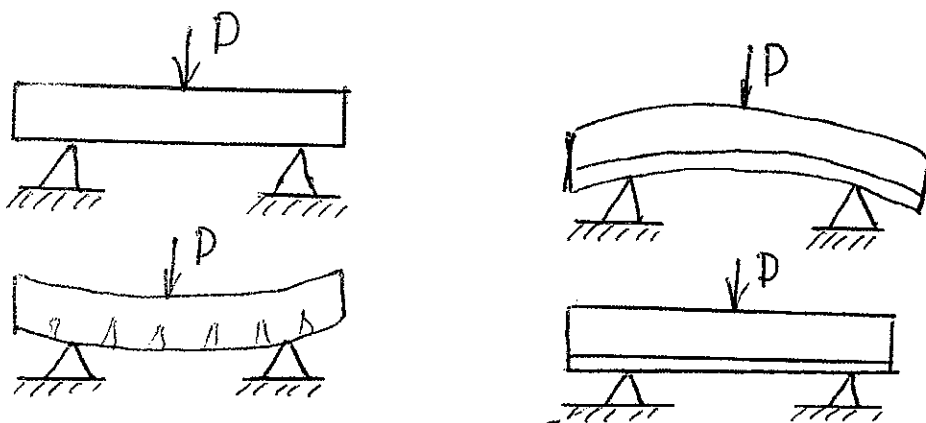
Формула Боломея-Скрамтаева справедлива для 28 суточного возраста бетона.

### Виды прочности бетона при сжатии

*Эталонная прочность* - основной показатель качества бетонов общестроительного назначения. Определяется в эталонном возрасте:

- 28 суток для портландцементных бетонов общестроительного назначения;
- для специальных бетонов или бетонов на других вяжущих может определяться в другие сроки, например, 180 суток – для гидротехнических бетонов, эксплуатируемых в пресной воде; 3 суток – для бетонов на глиноземистом цементе и т.д.

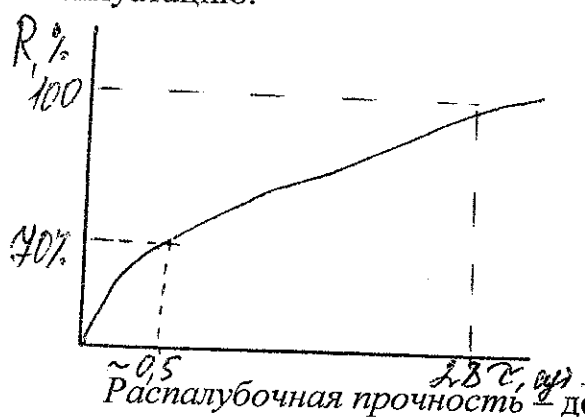
*Передаточная прочность* – предел прочности при котором производится передача усилия предварительного напряжения с арматуры на бетон в предварительно напряженных железобетонных конструкциях.



В таких конструкциях меньше прогибов и трещин.

Передаточная прочность составляет не менее 50% эталонной, но не менее 11 МПа.

**Отпускная прочность** – прочность бетона, при которой разрешается отгрузка изделий потребителю. При этом производитель гарантирует достижение эталонных показателей бетона в эталонном возрасте. Устанавливается 70, 85, 100 % от эталонной и указывается либо в ГОСТе, либо в ТУ на данный вид конструкции, а также с учетом срока ввода изделия в окончательную эксплуатацию.



В осенне-зимний период это значение повышается на 1 ступень (если летом 70%, то зимой 85%, если 85%, то 100%, если 100%, то 100%).

Распалубочная прочность – достаточная для извлечения изделия из формы и для выполнения транспортно-складских операций без повреждения изделия (стандартом не регламентируется, под каждое изделие свое значение, в среднем составляет 40- 60%).

### Предел прочности при растяжении

Является основным показателем качества бетона для конструкций, в которых в процессе эксплуатации недопустимо образование трещин в рабочей зоне, а предварительное напряжение невозможно или экономически нецелесообразно (плотины, трубы, резервуары и т.д.).

Нормируется классами  $B_{t0,4}$  -  $B_{t4,0}$  (через 0,4 МПа). Определяется испытанием образцов «восьмерок» на разрывной машине.

Прочность при растяжении зависит:

- от прочности на растяжение цементного камня;
- от прочности на растяжение заполнителей;
- от сцепления между цементным камнем и заполнителем, величина сцепления  $R_{сц} \approx 0,1 \dots 0,9 R_{тцк}$ .

В зависимости от особенностей заполнителей в составе бетона возможны три схемы разрушения:

- 1) Разрушение происходит по цементному камню и контактной зоне между цементным камнем и заполнителем (тяжелые бетоны низких и средних классов, когда  $R_{t\text{цк}} < R_{t\text{зап}}$ );
- 2) Разрушение происходит по контактной зоне и заполнителю (легкие бетоны на пористых заполнителях, высокопрочные бетоны классов  $>60$  МПа, когда  $R_{t\text{цк}} > R_{t\text{зап}}$ );
- 3) Смешанное разрушение и по цементному камню, и по заполнителю, и по контактной зоне (когда  $R_{t\text{цк}} \approx R_{t\text{зап}} \approx R_{\text{сцеп}}$ ).

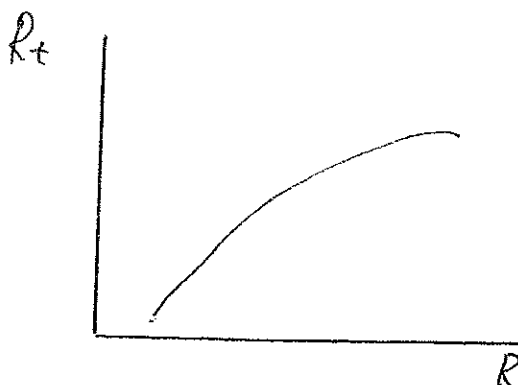


Для повышения прочности бетона на растяжение необходимо:

- снижать В/Ц;
- убирать дефекты из контактной зоны;
- использовать  $R_{t\text{цк}} < R_{t\text{зап}}$  в прочный, чистый заполнитель, обеспечивающий хорошее сцепление с цементным камнем.

### ***Взаимосвязь прочности при растяжении и прочности при сжатии***

Прочность на растяжение примерно в 15 – 20 раз меньше прочности при сжатии.



$R_t = 0,29 R^{0,6}$  (эмпирическая, по результатам многочисленных экспериментов)  
 $R_t = 0,5 R^{2/3}$  (формула Фере, справедлива для бетонов до В40)

### **Предел прочности на растяжение при изгибе**

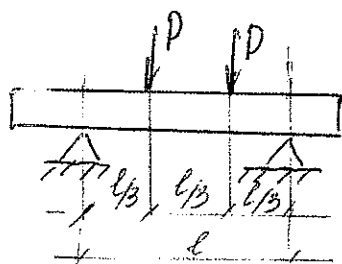
Является основным показателем качества специальных бетонов для конструкций, подвергающихся при эксплуатации изгибу, и в которых появление трещин не допустимо, а предварительное напряжение невозможно или



нецелесообразно. Является одним из показателей назначения (показателей качества) бетона для дорожных и аэродромных покрытий.

Прочность на растяжение при изгибе нормируется классами  $B_{tb}0,4$  -  $B_{tb}8,0$  (через 0,4 МПа). Определяют путем испытания призм квадратного сечения. Размеры образцов зависят от наибольшей крупности зерен заполнителя. Испытания производят по схеме балки на двух опорах, с приложением двух сосредоточенных сил на  $\frac{1}{3}$  пролета.

$B_{tb} = k B_t$  ( $k = 1,3 \dots 1,72$ ) и зависит от многих факторов.



## Лекция 5. Проектирование состава бетона

Цель проектирования состава бетона – установить такое соотношение между компонентами, которое позволяет обеспечить требуемые технологические свойства бетонной смеси и нормируемые показатели качества бетона в установленные сроки при минимальных материальных и энергетических затратах.

Для обеспечения экономичности бетона, как правило, стремятся получить бетон с минимальным расходом цемента, так как последний является самым дорогостоящим компонентом. Кроме того в цементном камне происходят усадочные деформации и как правило именно цементный камень подвержен коррозии, следовательно это один из факторов долговечности бетона.

Требования к прочности бетона, а в некоторых случаях, в соответствии с условиями эксплуатации, и к другим свойствам бетона – морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и др. указываются в проектно-технической документации на конструкцию.

Удобоукладываемость бетонной смеси, если она не задана, следует назначать по СНиП 3.09.01 "Производство сборных железобетонных конструкций и изделий" в соответствии со способом формования и видом конструкции.

Состав бетона выражают в виде расхода материалов по массе на  $1 \text{ м}^3$  бетона (например, Ц=320 кг/м<sup>3</sup>; В=180л/м<sup>3</sup>; П=680 кг/м<sup>3</sup>; Щ=1240 кг/м<sup>3</sup> ) или в виде количественного соотношения по массе или объему составляющих по отношению к цементу (например, Ц:В:П:Щ=1:0,6:2:4).

### *Порядок расчета*

1. Выбор и оценка качества сырьевых материалов.
2. Расчет величины цементно-водного отношения, обеспечивающего получение бетона заданной прочности.

Для этого вначале необходимо рассчитать значение средней прочности бетона для заданного класса бетона по прочности на сжатие по формуле:

$$R_b = \frac{B}{1-tv} = \frac{B}{1-1,64 \cdot 0,135} = \frac{B}{0,778}$$

Далее с помощью формулы Боломея-Скрамтаева производим вычисление значения Ц/В:

$$\text{Ц/В} = \frac{R_{\sigma}}{AR_{\eta}} \pm B$$

Необходимо стремиться подбирать составы бетона с Ц/В < 2,5

$$\text{Ц/В} = \frac{R_{\sigma}}{AR_{\eta}} + B$$

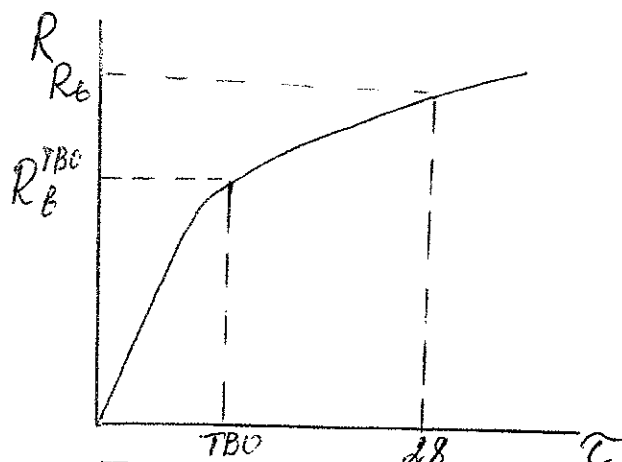
Если рассчитанное Ц/В > 2,5, то необходимо предпринять следующие мероприятия:

- применить цемент более высокой марки (активности);
- применить заполнители более высокого качества;
- оба мероприятия вместе;
- если не помогает, то пересчитать значение Ц/В по формуле:

$$\text{Ц/В} = \frac{R_{\sigma}}{A'R_{\eta}} - B$$

Проверка. По условию слитности бетона значение Ц/В ≥ 1,33, если это значение получается меньше, то целесообразно применить цемент с меньшей активностью, либо принять Ц/В = 1,33.

Если для твердения предусмотрена тепловлажностная обработка бетона, то для обеспечения требуемой прочности бетона после ТВО необходимо рассчитывать значение (Ц/В)<sub>ТВО</sub> по формуле Кайсера:



$$C/B = \frac{R_b^{TBO} + 8}{TBO \cdot 0,23 \cdot R_y^{TBO} + 10},$$

где  $R_b^{TBO}$  — средняя прочность бетона после ТВО, МПа;  
 $R_y^{TBO}$  — активность цемента при пропаривании (паспортная характеристика цемента).

При отсутствии фактических данных об активности цемента при пропаривании  $R_y^{TBO} = K_{mn} \cdot R_y$ ,

где  $K_{mn}$  — коэффициент эффективности при пропаривании — паспортная характеристика цемента ( $K_{mn} = R_{ц}^{TBO} / R_{ц}^{28}$

I -  $K_{mn} \geq 0,67$ ; II -  $0,56 < K_{mn} < 0,67$ ; III -  $K_{mn} < 0,56$ ).

3. Определение ориентировочного водосодержания бетонной смеси (расхода воды) производится в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и водопотребности вяжущего и заполнителей.

3.1 По таблицам находится значение водосодержания в зависимости от марки бетонной смеси по удобоукладываемости (П или Ж), от вида крупного заполнителя (щебень или гравий), а также его наибольшей крупности.

3.2 Делается поправка, учитывающая водопотребность вяжущего по НГ. Таблица составлена для НГ=25%. На каждый процент изменения НГ в ту или иную сторону водосодержание изменяется на  $\pm 3-5$  л/м<sup>3</sup>.

3.3 Делается поправка, учитывающая водопотребность песка, которая зависит от его крупности (модуля крупности  $M_k$ ). Таблица составлена для песков с  $M_k=2,0$ . На каждые 0,5 изменения модуля крупности в ту или иную сторону водосодержание бетонной смеси изменяется на  $\pm 3-5$  л/м<sup>3</sup>.

3.4 Делаются поправки, учитывающие повышенный расход цемента (свыше 450 кг/м<sup>3</sup>) и повышенный расход песка (свыше 700 кг/м<sup>3</sup>).

3.5 Делаются поправки, учитывающие температуру бетонной смеси. На каждый °С свыше +23 °С расход воды увеличивается на 1 л/м<sup>3</sup>.

Расход воды в бетонных смесях колеблется от 140 до 230 л/м<sup>3</sup>. Смесей марки П 3 и выше должны изготавливаться только с применением пластифицирующих добавок. Запрещается получать смеси П 4 и П 5 путем добавления воды. Если бетон будет эксплуатироваться в суровых условиях (мороз), то  $B < 200 \text{ л/м}^3$ .

4. Производится расчет расхода цемента с учетом найденных значений Ц/В и В:

$$Ц = (Ц/В)В$$

Полученные значения расхода цемента необходимо сверить с нормативными требованиями ГОСТ 26633 по минимальному расходу цемента, который назначается в зависимости от характера армирования конструкции, условий эксплуатации и вида цемента.

Максимальный расход цемента не должен превышать 600 кг/м<sup>3</sup>. Лишний цемент портит бетон. В бетонах общестроительного назначения рекомендован расход  $Ц \leq 450 \text{ кг/м}^3$ ,  $Ц > 450 \text{ кг/м}^3$  - в бетонах специального назначения.

5. Расчет расхода заполнителей производится по методу абсолютных объемов. Этот метод предполагает выполнение двух условий:

а) сумма абсолютных объемов всех компонентов в уплотненном состоянии равна 1000 л (1 м<sup>3</sup>)

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + B + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1000,$$

б) цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты в крупном заполнителе с учетом некоторой раздвижки зерен этим раствором

$$(Ц/\rho_{ц}) + B + (П/\rho_{п}) = V_{п.щ} \cdot \alpha(Щ/\rho_{нщ})$$

где Ц, В, П, Щ – соответственно расход цемента, воды, песка и щебня, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ц}, \rho_{п}, \rho_{щ}$  — соответственно истинная плотность цемента, песка и плотность щебня в куске, г/см<sup>3</sup>.

$V_{п.щ.}$  — пустотность крупного заполнителя;

$\rho_{нщ}$  — насыпная плотность крупного заполнителя, кг/л;

$\alpha$  — коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя показывает во сколько раз объем растворной составляющей превышает объем пустот в щебне:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_{нщ} \frac{Щ}{\rho_{нщ}}}$$

$\alpha \approx 1,05 - 1,6$  Чем более удобоукладываемая смесь, тем выше  $\alpha$ , но чем больше  $\alpha$ , тем выше расход цемента.

Решением системы двух уравнений получены расчетные формулы для расчета расходов заполнителей в кг/м<sup>3</sup>

$$Щ = \frac{1000}{\frac{\alpha v_{нщ}}{\rho_{нщ}} + \frac{1}{\rho_{щ}}}$$

$$П = (1000 - \frac{Ц}{\rho_{ц}} - B - \frac{Щ}{\rho_{щ}}) \rho_n.$$

Проверка. 1) В нормальной бетонной смеси расход щебня составляет 1100 – 1500 кг/м<sup>3</sup>.

2) Относительная объемная концентрация щебня определяется по формуле

$$\varphi = \frac{Щ}{\rho_{щ}}.$$

В нормальном бетоне  $\varphi = 0,39 - 0,5$ . Если  $\varphi < 0,39$ , то это малощебеночный или запесоченный бетон. Если  $\varphi > 0,5$ , то это неудобоукладываемая смесь. Если смесь должна быть перекачиваемой, то  $\varphi \leq 0,45$ . Рациональное значение  $\varphi = 0,42 - 0,44$ .

## **Проверка правильности расчета**

1. Определение расчетного значения средней плотности бетонной смеси  $\rho_{\text{БС}} = Ц + В + Ш(Г) + П$ .

Для обычных тяжелых бетонов средняя плотность бетонной смеси составляет 2350 - 2500 кг/м<sup>3</sup>.

2. Проверка слитности структуры. Необходимо убедиться, что количества цементного теста хватит для заполнения всех пустот в песке с небольшим избытком:

$$V_{\text{цт}} > 1.05 V_{\text{пн}}^*,$$

где  $V_{\text{цт}}$  - объем цементного теста, л:  $V_{\text{цт}} = \frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} + В$ ;

$V_{\text{пн}}^*$  - объем пустот в песке, л:  $V_{\text{пн}}^* = 0,95 v_{\text{пн}} \frac{П}{\rho_{\text{пн}}}$ ,

где  $v_{\text{пн}}$  - межзерновая пустотность песка  $v_{\text{пн}} = 1 - \frac{\rho_{\text{пн}}}{\rho_{\text{п}}}$

0,95 - коэффициент, учитывающий уменьшение объема пустот в песке при уплотнении.

3. Определение расчетного значения объема вовлеченного воздуха

$$ВВ = \left( 1000 - \frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} - В - \frac{Ш}{\rho_{\text{ш}}} - \frac{П}{\rho_{\text{п}}} \right)$$

В бетонных смесях без воздухововлечения значение величины ВВ должно стремиться к 0. Если получается  $\pm 20$  л/м<sup>3</sup>, то это результат округлений при вычислениях.

### **Корректировка состава бетона по результатам лабораторных испытаний**

- 1) Выполняется расчет состава на требуемую прочность бетона  $(Ц/В)_0$ .
- 2) Рассчитываются еще два дополнительных состава с Ц/В на 10-15% больше и меньше  $(Ц/В)_1 = 1,15(Ц/В)_0$  и  $(Ц/В)_2 = 0,85(Ц/В)_0$ .
- 3) Рассчитываются расходы материалов каждого состава на лабораторный замес  $V_3 = 7$  л. Делается замес с использованием сухих заполнителей. При выполнении лабораторного замеса осуществляется корректировка подвижности

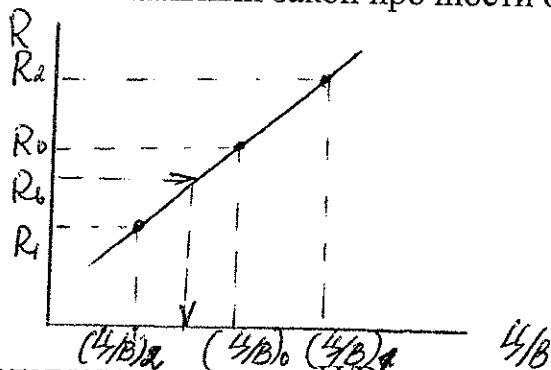
бетонной смеси. Если нужно увеличить подвижность, то добавляем воды, т.е. увеличиваем В/Ц; если необходимо уменьшить, то добавляем щебень и песок в пропорциональных отношениях.

4) В каждом замесе определяется фактическая плотность бетонной смеси в уплотненном состоянии (по ГОСТу).

5) Изготавливают контрольные образцы (3 штуки).

6) Испытывают образцы и определяют предел прочности при сжатии для каждого значения Ц/В.

7) Строится локальный закон прочности бетона.



8) Определяется значение Ц/В при котором достигается требуемый уровень прочности. ( $R_0$ )

9) Рассчитывается лабораторный состав. Состав бетонной смеси, при котором достигается требуемый уровень прочности с откорректированным по подвижности водосодержанием, с применением сухих заполнителей называется лабораторным или номинальным составом бетонной смеси.

### *Определение фактического состава бетонной смеси по результатам лабораторных испытаний*

Расчет производится с учетом фактической средней плотности бет. смеси.

1 Расчет фактического объема замеса:

$$\begin{aligned} R_{\text{бс}} &= 1000 \text{ л} \\ \sum m_k &= x(V_3) \rightarrow C = \frac{q \cdot 1000}{V_3} \quad V_3 = \frac{\sum m_k \cdot 1000}{\rho_{\text{б.см}}} \end{aligned}$$

$$\sum m_k = C' + B' + П' + Ш'$$

2 Расчет расхода материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\begin{aligned} V_3 &= C' \\ 1000 \text{ л} &= x(C) \rightarrow C = \frac{q \cdot 1000}{V_3} \rightarrow C = 1000 \frac{q}{m_3} \rho_{\text{б.см}} \end{aligned}$$



## **Определение производственного состава бетона с учетом влажности заполнителей**

$$W = \frac{m_{\text{в}} - m_c}{m_c}$$

W- влажность материала

Находятся расходы влажных заполнителей:

$$\Pi^{\text{в}} = \Pi \left( 1 + \frac{W_n}{100} \right)$$

$$\Pi^{\text{в}} = \Pi \left( 1 + \frac{W_{\text{ш}}}{100} \right)$$

Рассчитывается вода, содержащаяся во влажных заполнителях:

$$B_n = \Pi^{\text{в}} - \Pi, \quad B_{\text{ш}} = \Pi^{\text{в}} - \Pi$$

Производится корректировка количества воды затворения:

$$B^{\text{с}} = B - B_n - B_{\text{ш}}$$

### **Определение расхода материала на объем бетоносмесителя**

1) Паспортная характеристика бетоносмесителя «объем по готовому замесу»:

Расход материалов на объем бетоносмесителя  $m_i$  по готовому замесу рассчитывается по формуле:

$$m_i = \frac{M}{1000} V_{\text{см}}$$

2) Расход материалов на «объем бетоносмесителя по загрузке» (паспортная характеристика бетоносмесителя) рассчитывается следующим образом.

Рассчитывается коэффициент выхода бетонной смеси  $\beta$ . Коэффициент бетонной смеси показывает какую часть составляет объем готовой бетонной смеси составляет по отношению к суммарному объему сухих компонентов в рыхло-насыпном состоянии.

$$\beta = V_{\text{б.см}} / \sum V_{\text{сух.мат}}$$

$$\beta = \frac{1000}{\frac{\Pi}{\rho_{\text{н.п}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\text{н.ш}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\text{н.л}}}}$$

$$\beta = 0,62 - 0,69$$

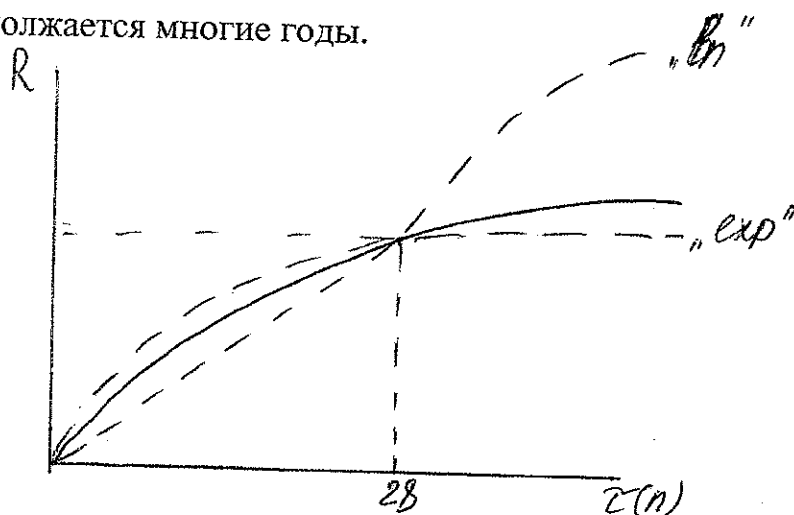
$$V_{\text{см}} = \beta V_{\text{загр}}$$

$$m_{\text{загр}} = \beta \frac{M}{1000} V_{\text{см}}$$

## Тема 6. Влияние условий твердения на прочность бетона

### Зависимость прочности бетона от времени (продолжительности) твердения

Формирование прочности бетона происходит вследствие гидратации портландцемента, которая может продолжаться в течение многих десятилетий. Следовательно, в благоприятных условиях рост прочности бетона продолжается многие годы.



В возрасте бетона до 28 суток зависимость прочности от продолжительности твердения описывается логарифмическим законом:

$$\frac{R_{28}}{R_n} = \frac{\lg 28}{\lg n} \rightarrow R_n = \frac{R_{28} \cdot \lg n}{\lg 28}$$

Логарифмический закон действует после образования первоначальной структуры бетона, т.е. после приобретения бетоном определенной первоначальной прочности ( $n > 3$ ).

После 28 суток нормального твердения зависимость прочности от продолжительности твердения в большей степени подчиняется экспоненциальному закону:

$$R_n = R_{28} \exp \left( b \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{n}} \right) \right)$$

где  $R_{28}$  — прочность бетона в эталонном возрасте, МПа;

$R_n$  — прочность бетона в заданном возрасте, МПа;

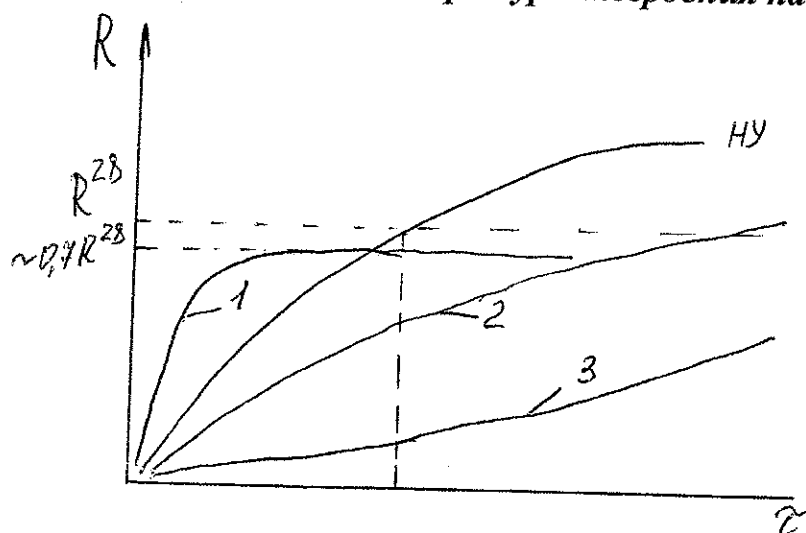
$b$  — коэффициент, равный 0,2 — для быстро твердеющих, 0,25 — для нормально твердеющих, 0,33 — для медленно твердеющих бетонов;

$n$  — возраст твердения бетона, сут.

В действительности темп роста прочности бетона, особенно в раннем возрасте, зависит от многих факторов:

- минералогического состава клинкера;
- тонкости помола цемента;
- состава бетона, в частности В/Ц;
- вида и дозировки используемых химических добавок.

#### *Влияние температуры твердения на прочность бетона*



НУ – бетон, твердеющий в нормальных условиях, т.е. при  $t=20^{\circ}$

1. Бетон, твердеющий при  $t>20^{\circ}\text{C}$ . Как известно, нагрев ускоряет химические реакции, тем самым активизирует взаимодействие воды и цемента и ускоряет твердение бетона. Однако, при повышенных температурах наряду с процессами структурообразования происходят деструктивные процессы, приводящие к снижению прочности до 30%.
2. Бетон, твердеющий при  $t<20^{\circ}\text{C}$ , но  $t>0^{\circ}\text{C}$ . Низкая положительная температура влияет на время достижения бетоном заданной прочности, но не влияет на свойства бетона.
3. Бетон, твердеющий при  $t<0^{\circ}\text{C}$ . Бетон, начавший твердеть, а потом замерзший, продолжает твердеть после оттаивания в теплой среде, правда с меньшей скоростью. Замерзание бетона в раннем возрасте влечет за собой значительное понижение прочности после его оттаивания и дальнейшего твердения. В результате проектную прочность мы можем никогда не получить.

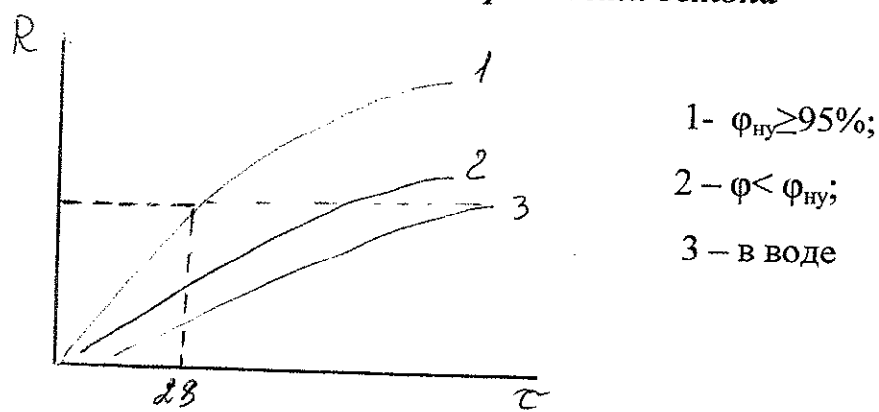
Прочность бетона, полученная при замерзании стремится к критическому значению. Критическая прочность – это такая прочность, при достижении которой бетон может быть заморожен, но это замораживание не влияет отрицательно на его структуру и свойства.

В России  $[R] \approx 10 - 12$  МПа, для В15 составляет 50%

В22,5-25 – 40%

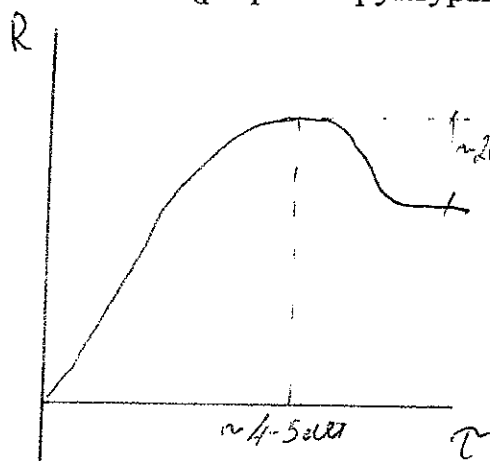
В35 – 30%

### *Влияние влажности окружающей среды на формирование прочности бетона*



Для формирования прочности бетона необходимы:

- высокая влажность ( $\varphi \geq 95\%$ );
- отсутствие испарения, т.к. вода необходима для гидратации, кроме того испарение вызывает влажностную усадку;
- отсутствие длительного пребывания бетона в воде, т.к. с одной стороны это благоприятно для гидратации, но может привести к снижению прочности до 20% из-за чрезмерного насыщения пор водой, оказывающей расклинивающее действие (разрыв структуры).



Бетоны, твердевшие в НУ, т.е. при  $\varphi \geq 95\%$ , через 5 лет могут потерять 15-20% прочности, но в дальнейшем этот процесс стабилизируется.

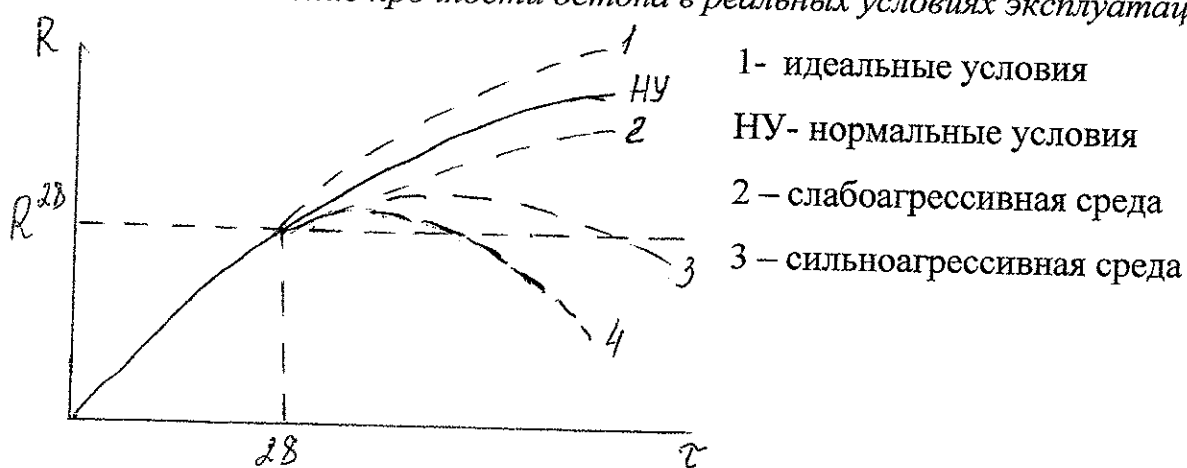
Бетоны, твердевшие при  $\varphi < 95\%$  никогда не набирают требуемую прочность.

Бетон в процессе твердения должен находиться во влажных условиях. Недопустимо испарение воды из свежееуложенного бетона. В связи с этим необходим уход за твердеющим бетоном. Уход бывает первичным и последующим.

Первичный — для предотвращения испарения воды. Продолжают до достижения  $R=0,5\text{МПа}$ .

Последующий — для поддержания влажного состояния бетона и отсутствия перепада температур.

*Изменение прочности бетона в реальных условиях эксплуатации*



Спад прочности в реальных условиях эксплуатации зависит от того качественный или некачественный бетон был получен и от степени агрессивности среды. В неагрессивной среде качественный бетон будет служить долго. В агрессивной среде происходит разрушение структуры бетона.

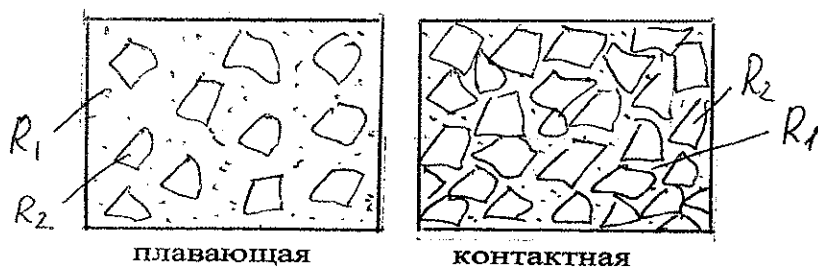
## Тема 7. Структура бетона. Общие закономерности «Состав-структура-свойства» для цементных бетонов

Структура бетона образуется в результате схватывания бетонной смеси и последующего твердения бетона. Формирование структуры бетона происходит в течение длительного времени в результате физических, физико-химических и химических процессов. Структура бетона зависит от его состава, т.е. соотношения между компонентами, условий уплотнения и твердения, продолжительности твердения, агрессивности среды. Определяющее влияние на ее формирование оказывают гидратация цемента, его схватывание и твердение, т.е. образование цементного камня.

Структура бетона по содержанию цементного камня и его размещению в бетоне классифицируется следующим образом:

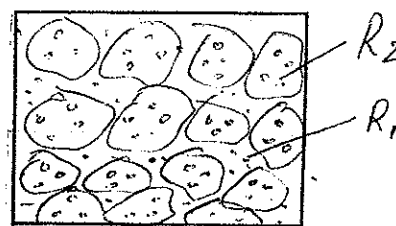
- плотная;
- плотная с пористым заполнителем;
- зернистая;
- ячеистая.

Плотная структура



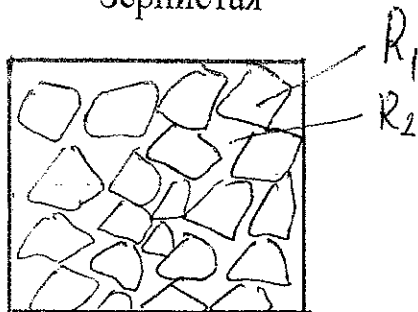
$$R_2 > R_0 > R_1$$

Плотная с пористым заполнителем



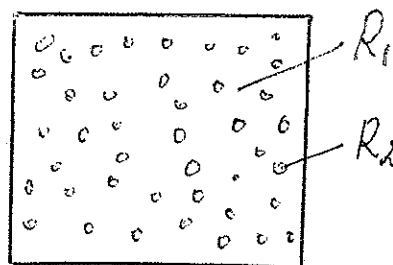
$$R_2 < R_0 < R_1$$

Зернистая



$$R_1 > R_0, R_2 = 0$$

Ячеистая



$$R_1 > R_0, R_2 = 0$$

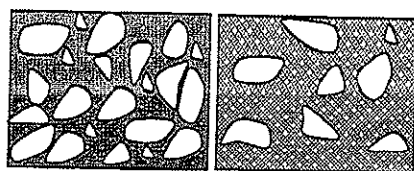
Свойства бетона во многом зависят от его плотности или пористости. Наибольшей прочностью обладают материалы с плотной структурой, наименьшей – с зернистой. Плотные материалы менее проницаемы, чем зернистые и ячеистые. Которые обладают наибольшим водопоглощением.

Большое значение на свойства материала оказывает размер зерен, пор или других структурных элементов. В связи с этим различают несколько уровней структуры бетона.

**Макроструктура.** Это структура видимая невооруженным взглядом или при небольшом увеличении. Рассматривается как система «матрица (растворная составляющая – контактная зона – крупный заполнитель)». В матрице рассматриваются поры, т.е пространства различного происхождения, не заполненные твердым веществом. На макроуровне различают структуру с контактным и «плавающим» расположением заполнителя, которая определяется концентрацией заполнителя в единице объема.

Структура с «контактным» расположением зерен заполнителя. Получается при высокой концентрации заполнителя и малым объемом цементирующего вещества. В этом случае зерна плотно скреплены между собой с тонкой прослойкой цементного камня. Такая структура обеспечивает повышенную прочность бетона при сжатии, снижает опасность трещинообразования.

С увеличением расхода цемента, и соответственно относительного содержания цементирующего вещества, концентрация заполнителей снижается. В результате создается структура с "плавающим" расположением зерен заполнителя, т.е зерна находятся на значительном удалении друг от друга. В этом случае прочность бетона определяется только прочностью растворной составляющей.



I II

I – смесь с контактным расположением зерен; II – смесь с "плавающим" заполнителем

*Микроструктурой* называют структуру, видимую при большом увеличении под микроскопом. Рассматривается на уровне строения цементного камня.

Микроструктура цементного камня представляет собой неоднородную систему, которая состоит из новообразований, непрореагировавших с водой зерен вяжущего и микропор различных размеров и строения. Новообразования представлены кристаллическими сростками и гелеобразными массами. Структурная пористость бетона определяется пористостью цементного камня, обусловленной начальным водосодержанием бетонной смеси и воздухововлечением при ее перемешивании.

Для химического взаимодействия с цементом достаточно 18...22% воды от массы цемента, а для получения удобоукладываемой смеси воды требуется 40...60%. Вода, не вступившая в процесс гидратации цемента, при испарении образует капиллярные поры. Капиллярные поры можно представить как сообщающиеся между собой каналы переменного сечения и различной степени извилистости. Радиус капиллярных пор – до 2 мкм. Объем капиллярных пор может находиться в пределах от 0 до 40% от объема цементного камня.

Наряду с капиллярами в цементном камне в процессе гидратации и твердения образуются гелевые и контракционные поры.

Гелевые поры – это самые мелкие поры с размерами от 0,0015 до 0,030 мкм, которые формируются в новообразованиях цементного камня коллоидных размеров. Вода в гелевых порах прочно удерживается адсорбционными силами, что делает их практически водонепроницаемыми. Эти поры оказывают влияние на усадку, ползучесть и другие деформативные свойства бетона. Объем гелевых пор составляет 28% от объема новообразований.



Контракционные поры – это замкнутые поры, которые образуются в результате уменьшения объема системы "цемент-вода" в процессе гидратации. Объем контракционных пор составляет  $7...9 \text{ см}^3$  на 100 г цемента. Они способствуют повышению морозостойкости и сульфатостойкости бетона.

При вовлечении воздуха в бетонную смесь образуются сферические, замкнутые, достаточно крупные поры размером  $0,1...2,0 \text{ мм}$ . Эти поры оказывают положительное влияние на стойкость бетона в некоторых условиях, хотя при этом прочность снижается.

Пористость бетона зависит от степени гидратации цемента и со временем изменяется: общая и капиллярная пористость снижается, гелевая и контракционная увеличивается.

**Мезоструктура.** Эта структура рассматривается на уровне «матрица (цементный камень) – контактная зона – мелкий заполнитель».

Контактная зона формируется вблизи зерен заполнителя и по своим свойствам больше или меньше отличается от структуры основной массы цементного камня. В бетоне происходит "срачивание" цементного камня с поверхностью заполнителя в результате физико-химических процессов: влияния поверхностных сил и миграции к зернам заполнителя гидроксида кальция, образующегося при твердении цемента.

## Тема 8. Физические свойства бетона

### Плотность бетона

Следует различать плотность незатвердевшей бетонной смеси и затвердевшего бетона. Бетонная смесь может быть почти совершенно плотной с учетом содержащейся в ней воды. Это происходит в том случае, если ее состав точно рассчитан и она плотно уложена. Качество уплотнения бетонной смеси оценивается коэффициентом уплотнения:

$$K_{упл} = \frac{\rho_{ср.ф}}{\rho_{ср.р}}$$

$\rho_{ср.ф}$  — фактическая средняя плотность бет. смеси;  
 $\rho_{ср.р}$  — расчетная средняя плотность бет. смеси.

Обычно стремятся получить коэффициент уплотнения  $K_{упл} \approx 1$ , но вследствие воздухововлечения при вибрации  $K_{упл} \approx 0,96 - 0,98$ .

В затвердевшем бетоне только часть воды находится в химически связанном состоянии. Остальная (свободная) вода остается в порах или испаряется. Поэтому затвердевший бетон никогда не бывает абсолютно плотным. Пористость бетона может быть определена по формуле:

$$П = \frac{B - \omega Ц}{1000} 100$$

Где  $B$  и  $Ц$  — расходы воды и цемента, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  — доля химически связанной воды (от массы цемента), в возрасте 28 суток принимается равной  $\omega = 0,15$ .

### Пути повышения плотности бетона

- тщательный подбор зернового состава заполнителей, обеспечивающий минимальный объем пустот в смеси заполнителей, а следовательно минимальный объем цементного камня в бетоне;
- применение цементов, требующих для гидратации больше воды (высокопрочный портландцемент, глиноземистый и расширяющиеся цементы) или цементы, занимающие больший абсолютный объем (пуццолановый портландцемент);

- снижением В/Ц, в том числе и применением пластифицирующих добавок;
- уплотнением бетонной смеси при укладке (например вибрированием);
- удалением части воды из свежееуложенного бетона при укладке (например центрифугирование, вакуумированием).

Плотность бетона является важнейшим свойством, определяющим прочность, непроницаемость и долговечность бетона.

### Водонепроницаемость бетона

Является основным нормируемым показателем качества бетона, определяющим стойкость бетона, эксплуатируемого в агрессивных средах (вода, растворы солей и кислот).

Водонепроницаемость бетона зависит от его пористости, структуры пор, свойств вяжущего и заполнителей.

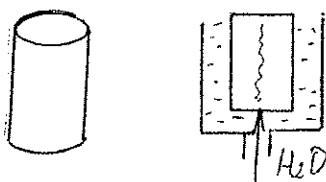
Проникновение воды в бетон происходит через макропоры цементного камня с радиусом более 0,1 мкм, седиментационные поры бетона, дефекты уплотнения и в некоторых конструкциях возможно через крупные сквозные каналы в теле бетона.

Плотные бетоны обычно непроницаемы для воды, действующей без напора. Для оценки водонепроницаемости бетона используют марки от W2 до W20. Цифра показывает величину избыточного (сверх атмосферного) давления воды, которое выдерживают образцы без фильтрации в стандартных испытаниях.

Марка по водонепроницаемости определяется испытанием стандартных образцов под давлением и показывает величину давления, при котором бетон еще не пропускает воду. Например, бетон марки W12 выдерживает без фильтрации давление воды до 1,2 МПа (1 атм=0,1 МПа).

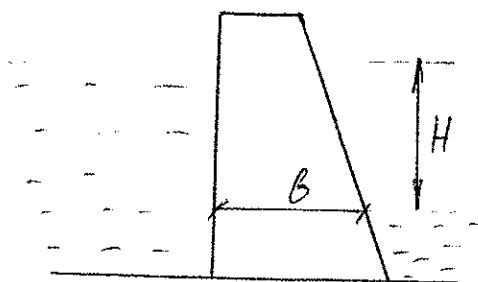
### Стандартные испытания по методу «мокрого пятна»

Изготавливаются бетонные образцы-цилиндры размером  $H=D=150$  мм в количестве 6 штук.



Вода подается под давлением по 2 атм. Производится выдержка образцов при каждом значении давления в течение 16 часов. Фиксируется максимальное давление при котором 4 из 6 образцов не пропускают воду.

Для бетона напорных конструкций марка по водонепроницаемости  $W$  назначается в зависимости от градиента напора  $L$ .



Градиент напора определяется по формуле:

$$L=H/b,$$

Где  $H$  - давление воды, м водяного столба;

$b$  - толщина конструкции, м.

Тогда  $W=0,4L + 2$

Водонепроницаемость бетона можно оценивать коэффициентом фильтрации, который измеряется количеством воды, прошедшим через  $1 \text{ см}^2$  образца в течение 1 часа при постоянном давлении.

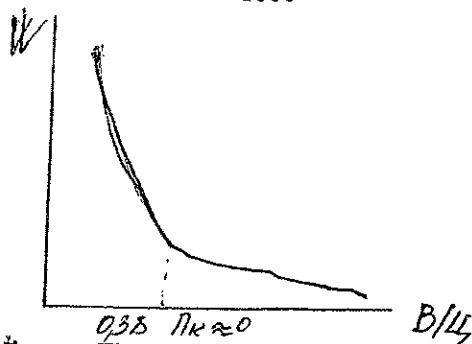
Основными факторами, определяющими водонепроницаемость бетона являются:

- капиллярные поры  $\Pi_k$  ;
- дефекты контактной зоны;
- трещины.

#### Способы повышения водонепроницаемости бетона

##### 1. Уменьшение капиллярной пористости $\Pi_k \rightarrow 0$

$$\Pi_k = \frac{B - 2\omega\zeta}{1000} 100$$



Для этого, в первую очередь нужно снижать  $B/\zeta$ .  $B/\zeta \leq 1,68 \text{ НГ}$ . Снижение  $B/\zeta$  меньше 0,38 резко увеличивает водонепроницаемость.

4. Для улучшения прочности контактной зоны необходимо применять качественный заполнитель. Содержание в щебне ПГЧ < 1%, в гравии ПГЧ < 2%.

3.  $\Pi_k \neq 0$ , поэтому нужно закупоривать поры. При увлажнении бетона мельчайшие поры и капилляры заполняются водой, которая под действием физических поверхностных сил значительно теряет свою подвижность и как бы закупоривает эти капилляры. Наступает «кольматация» пор и капилляров, что приводит к уменьшению проницаемости бетона.

4. Повторное вибрирование.

5. Необходимо бороться с усадкой  $\varepsilon_{sh} \rightarrow 0$ , что препятствует образованию трещин. Для этого необходимо обеспечивать нормальные условия твердения.

6. Введение тонкомолотых минеральных добавок, пластифицирующих, гидрофобных и других добавок снижает проницаемость в несколько раз.

Снижение водопроницаемости бетона положительно влияет на его стойкость.

### Морозостойкость бетона

Это способность бетона в водонасыщенном или насыщенном растворе соли состоянии выдерживать многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения (трещин, сколов, шелушения ребер образцов), снижения прочности, изменения массы и других технических характеристик.

Морозостойкость является основным нормируемым показателем качества бетона, определяющим долговечность железобетона при эксплуатации в условиях атмосферных воздействий.

Морозостойкость нормируется марками по морозостойкости по ГОСТ 10060-12.

$F_1$  - марка по морозостойкости бетона, испытанного в водонасыщенном состоянии, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий, а также бетонов, эксплуатируемых при воздействии минерализованной воды ( $F_{125}$ - $F_{100}$ ).

F<sub>2</sub>- марка по морозостойкости бетона дорожных и аэродромных покрытий и бетона, эксплуатируемого при воздействии минерализованной воды, и определенная при испытании образцов, насыщенных 5%-ным водным раствором хлорида натрия (F<sub>2</sub>50 - F<sub>2</sub>1000).

Марка бетона по морозостойкости - показатель морозостойкости бетона, соответствующий числу циклов замораживания и оттаивания образцов, определенному при испытании базовыми методами, при которых характеристики бетона сохраняются в нормируемых пределах и отсутствуют внешние признаки разрушения (трещины, сколы, шелушение ребер образцов).

Марка бетона по морозостойкости указывается в ГОСТах, ТУ, рабочих чертежах на конкретные изделия.

Назначение марки по морозостойкости производится в зависимости от следующих условий:

- 1) Климатическая зона (средняя температура пятидневки);
- 2) Условия эксплуатации (систематическое водопоглощение, эпизодическое, воздушно-сухие условия);
- 3) Количество переходов через 0°C;
- 4) Степень нагруженного состояния.

Способы измерения морозостойкости:

- прямые;
- косвенные.

***Прямые способы измерения морозостойкости по ГОСТ 10060-2012.***

Базовые методы при многократном замораживании и оттаивании.

Первый I – производится испытанием замороженных на воздухе образцов, насыщенных водой, и последующим их оттаиванием в воде. Выполняется для всех видов бетонов, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий и бетонов конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия минерализованной воды (содержащей растворенные соли в количестве 5 г/л и более).

Второй II – производится испытанием замороженных на воздухе об-

разцов, насыщенных в 5% раствором HCl, и последующим их оттаиванием в 5% растворе HCl. Применим для бетонов дорожных и аэродромных покрытий и для бетонов конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия минерализованной воды.

Ускоренные методы при многократном замораживании и оттаивании.

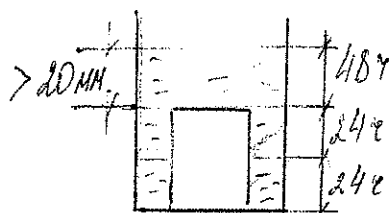
Второй II- для всех видов бетонов, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий и бетонов конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия минерализованной воды, легких бетонов марок по средней плотности менее D1500

Третий III – производится испытанием насыщенных, замороженных и оттаявших в 5% растворе HCl. Производится для всех видов бетонов, кроме легких бетонов марок по средней плотности менее D1500.

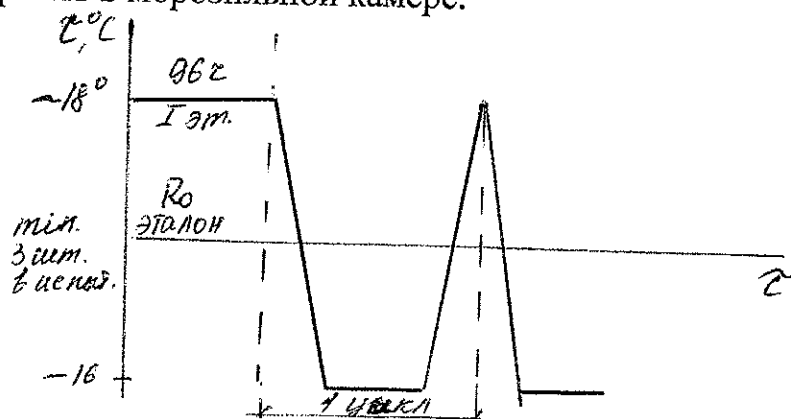
| Способ           | Среда (Н) насыщения | Среда (З) замораживания | Среда (О) оттаивания | Температура $t_z$ , °C | Температура $t_o$ , °C | Длительность $t_z$ , час. | Длительность $t_o$ , час. |
|------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Базовый метод    |                     |                         |                      |                        |                        |                           |                           |
| I                | H <sub>2</sub> O    | воздух                  | H <sub>2</sub> O     | -16...20               | +18..20                | ≥2,5 (3,5)                | ≥2±0,5                    |
| II               | 5% р-р HCl          | воздух                  | 5% р-р HCl           | -16...20               | +18..20                | ≥2,5(3,5)                 | ≥2±0,5                    |
| Ускоренный метод |                     |                         |                      |                        |                        |                           |                           |
| II               | 5% р-р HCl          | воздух                  | 5% р-р HCl           | -16...20               | +18..20                | ≥2,5(3,5)                 | ≥2±0,5                    |
| III              | 5% р-р HCl          | 5% р-р HCl              | 5% р-р HCl           | -50                    | -10<br>+18..20         | ≥2,5(3,5)                 | 1,5±0,5<br>≥2±0,5         |

Для испытания на морозостойкость изготавливают серию образцов каб с размером ребра 100 мм (150мм): 6 образцов контрольных (эталонных) и 12 основных (испытываемых).

Все образцы в возрасте 28 суток подвергаются насыщению в соответствующей способу испытания среде в течение 96 часов. В первые 24 часа среда наливается на 1/3 высоты, вторые 24 часа – на 2/3 высоты и 48 часов полностью погруженные в среду, так чтобы уровень жидкости был на 20 мм выше.



Далее эталонные образцы подвергаются испытанию на сжатие в водонасыщенном состоянии. А испытуемые подвергаются замораживанию-оттаиванию. При замораживании время замораживания отсчитывается от того момента, когда температура в камере опустится ниже  $16^{\circ}\text{C}$ . Делаем столько циклов, сколько указано в ГОСТе. Например, если F100, то первое испытание делается через 75 циклов (испытывается 3 образца). И не зависимо от полученного результата испытания доводятся до 100 циклов. В сутки делается не менее одного цикла. Если выпадают выходные дни, то образцы нужно держать в морозильной камере.



Испытания на морозостойкость производят не реже 1 раза в три месяца, а также при изменении материалов и технологии.

### Критерии морозостойкости

#### 1. Прочностной критерий

$$k_{F,R} = \frac{R_F}{R_0} \geq 0,95$$

Снижение прочности допускается не более 5%.

#### 2. Потеря массы

$$k_{F,m} = \frac{m_F}{m_0} \geq 0,97$$

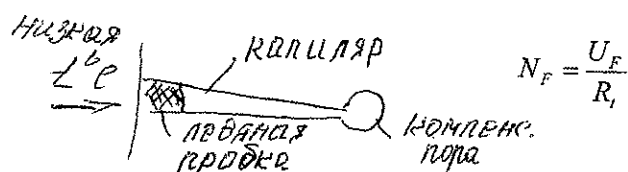
Для дорожных бетонов обязательным должно быть выполнение 1-го и 2-го условия, для остальных — выполнение 2-го критерия не обязательно.

### Факторы, определяющие морозостойкость

Основной причиной, вызывающей разрушение бетона при попеременном замораживании и оттаивании является давление на стенки пор и устья микротрещин, создаваемое замерзшей водой. Морозостойкость бетона одно-



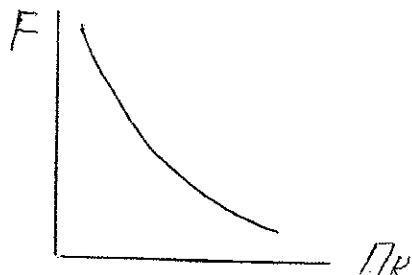
значно определяется уровнем растягивающих напряжений, возникающих в структуре бетона при замерзании, т.е. отношением величины напряжения к пределу прочности в каждой точке материала.



При замерзании вода увеличивается в объеме примерно на 9%. Вода, проникшая в трещины или поры замерзает, образуя ледяную пробку. Распирению воды препятствует твердый скелет бетона, в котором могут возникнуть очень большие напряжения. Промерзая, пробка увеличивается и давит на незамерзшую воду в трещине и трещина разрастается. Повторяемость замерзания и оттаивания приводит к постепенному разупрочнению структуры бетона и его разрушению.

### *Пути повышения морозостойкости*

1. Повышение плотности бетона, исключение трещин, минимализация капиллярных пор и их проницаемости для воды, например за счет снижения В/Ц, применения добавок, гидрофобизирующих стенки пор, или пропиткой бетона специальными составами с целью заполнения пор (кальматация).



2. Создавать компенсационную пористость за счет применения воздухововлекающих добавок. Специально созданные замкнутые поры не заполняются при обычном водошасыщении, но при замерзании воды способны погасить возникающие напряжения в бетоне. Оптимальный объем вовлеченного воздуха составляет 4-6%.

## **Тема 9. Деформативные свойства бетона**

В процессе эксплуатации конструкции подвергаются силовым воздействиям (нагрузкам) и не силовым (изменение температуры, влажности, радиации).

Указанные воздействия вызывают появление в бетоне напряжений и деформаций, т.е. возникает напряженно-деформированное состояние (НДС).

Все деформации делятся на:

- не силовые внутренние (деформации усадки);
- не силовые внешние (температурные деформации);
- силовые (при кратковременном нагружении и при длительном нагружении).

### **Усадка бетона**

Усадкой называется уменьшение объема материала во времени в следствие не силовых воздействий.

В зависимости от причин различают:

- химическую усадку (контракционную и карбонизационную);
- физическую усадку (влажностную и радиационную).

Усадка приводит к образованию трещин и влечет за собой снижение долговечности.

### **Количественные показатели усадки**

Как правило, деформации усадки характеризуются величиной относительной линейной усадки. Усадка измеряется, как изменение линейных размеров или изменение объема образцов-балочек размером 40x40x160 мм или 200x200x800 мм.

$$\varepsilon_{sh} = \frac{l_0 - l}{l_0}, \text{ мм/м}$$

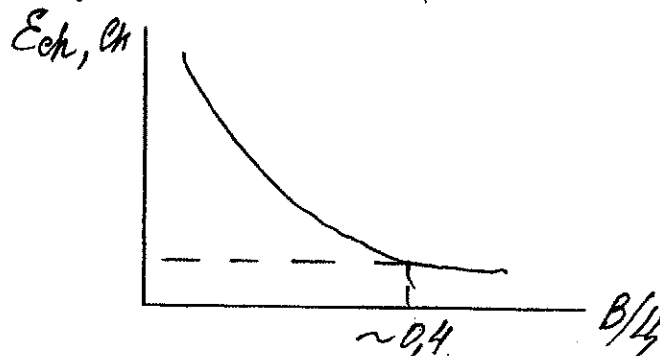
Начальный отсчет производится не позднее, чем через 4 часа после распалубки. Продолжительность измерений обычно продолжается в течение 120 суток. При этом фиксируется величина общей деформации усадки, т.е. величина влажностной, контракционной и карбонизационной усадки при такой методике измерения неразделимы.

## Виды усадочных деформаций

*Контракционная (химическая) усадка* протекает в следствие процессов гидратации цемента, т.к. объем новообразований меньше суммарного объема вступающих в реакцию веществ. Величина контракционной усадки составляет 0,2 – 4 мм/м.

Развивается наиболее интенсивно в первые 3- 5 суток твердения.

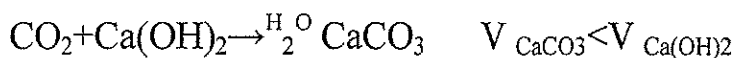
Контракционная усадка зависит от В/Ц.



Снизить величину контракционной усадки можно следующими способами:

- замедлить процесс твердения в ранний период;
- добавить в портландцемент расширяющие добавки, либо заменить портландцемент на расширяющийся.

*Карбонизационная усадка* вызвана взаимодействием гидроксида кальция с атмосферным углекислым газом с образованием карбоната кальция.

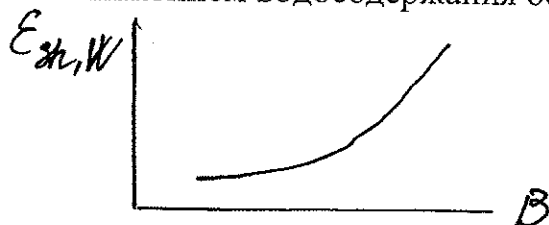


Этот процесс называется карбонизацией и развивается постепенно в течение нескольких лет с поверхности бетона в глубину. Величина такой усадки незначительна и составляет  $\approx 0,1$  мм/м.

*Влажностная усадка* развивается в цементном камне (бетоне) вследствие удаления (испарения) физически связанной воды из порового пространства. Такая усадка развивается в течение нескольких месяцев. Величина влажностной усадки у тяжелого бетона 0,3 – 0,8 мм/м.

Снизить величину влажностной усадки можно следующими способами:

- снижением водосодержания бетонной смеси;



Зависимость степенная:

$$\epsilon_{sh} = k(B)^{3/2}$$

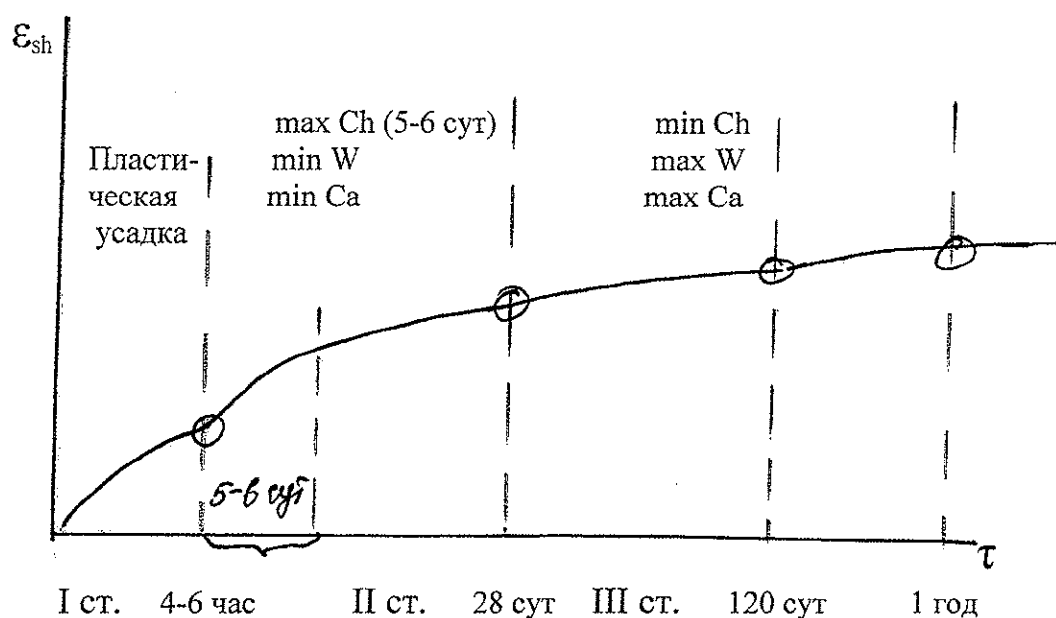
- уменьшению усадки способствует длительное влажностное твердение, т.е. влажностный уход за твердеющим бетоном необходим.

### Общая картина усадки бетона во времени

I стадия – пластическая деформация в СУБ.

II стадия – развивается в твердеющем бетоне до эталонного возраста (ТБ).

III стадия – в бетоне зрелого возраста (БЗВ).



**I стадия (СУБ)** – пластическая усадка, которая развивается в свежесуложенном бетоне в течение 4-6 часов с момента окончания уплотнения. Происходит это из-за испарения воды из свежесуложенного бетона.

Величина пластической усадки бетона может достигать 6 мм/м.

Результат пластической усадки:

- зияющие трещины на поверхности конструкции (ширина более 1 мм, шаг 40-80 см), это видимая часть последствий;
- скрытая часть последствий – это необратимая потеря прочности до 50%, снижение морозостойкости до 10%.

Способов устранения последствий пластической усадки нет.

Защита от пластической деформации заключается в предотвращении испарения воды из СУБ и обеспечении первичного ухода:

- укрытие (с прикаткой) поверхности водонепроницаемой пленкой;
- нанесение на поверхность пленкообразующих быстрополимеризующихся составов.

Продолжительность первичного ухода должна быть такой, чтобы бетон достиг прочности 0,5 МПа.

**II стадия (ТБ)** развивается в твердеющем бетоне до 28 суток. В течение первых 5 суток наибольшее развитие получает конструкционная (химическая) усадка. Параллельно с контракционной усадкой развивается влажностная усадка и минимальная карбонизационная усадка.

Усадка в возрасте 28 суток составляет примерно 70% от 120-суточной.

**III стадия (БЗВ)** развивается в бетоне до 120 суток. На этой стадии происходят минимальные контракционные усадки, влажностная усадка проявляется, но постепенно ослабевает, в большей степени возрастает влияние карбонизационной усадки.

После 120 суток усадка продолжается дальше, но интенсивность ее зависит от конструкции. Усадка 120 сут. Составляет примерно 70% годовой. К 1 году усадка более или менее стабилизируется если не меняются температурно-влажностные условия. Если изменяются условия, то усадка будет меняться.

## Температурные деформации бетона

Бетон, как и другие твердые материалы расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении.

Количественно температурные деформации бетона характеризуются коэффициентами температурных деформаций.

$$\text{Линейные деформации} - \alpha_{\Delta t} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\text{Объемные деформации} - \beta_{\Delta t} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$\alpha = (6 - 15) 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}, \quad \beta \approx 3\alpha.$$

Коэффициент линейного расширения зависит:

- от состава бетона, с увеличением содержания цементного камня  $\alpha$  увеличивается;

- от свойств сырьевых материалов (рассчитывается по правилу бетонных смесей;

$$\alpha_b = \frac{\alpha_{цк} V_{цк} + \alpha_s V_s}{V_{цк} + V_s}$$

- от влажностного соотношения;

- от температуры, при которой определялось значение  $\alpha$ .

Температурные деформации бетона близки по значениям к температурным деформациям стали, что дает возможность их совместной работе в железобетонных конструкциях при различных температурных условиях окружающей среды.

### Силовые деформации.

Бетон является упруго-пластическим материалом, т.е. при нагружении в нем возникают вначале упругие деформации, а затем к ним присоединяются пластические.

Для характеристики упругих свойств бетона определяют начальный *модуль упругости  $E_n$* , который характеризует деформативность бетона при кратковременной нагрузке, которая составляет примерно 30% от разрушающей. Так как бетон является упруго-пластическим материалом, то измерить упругие деформации можно только сразу после приложения нагрузки, а при относительно длительном действии нагрузки, например в течение 1 ч, к упругим деформациям добавляются пластические.

*Ползучесть* – это способность к увеличению пластических деформаций в течение длительного времени при постоянной нагрузке. Ползучесть бетона обусловлена наличием в цементном камне гелевой составляющей, которая удерживает большое количество адсорбционно связанной воды. В течение длительного времени под действием нагрузки эта вода как бы выжимается из гелевых пор, при этом бетон деформируется.