

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»  
Архитектурно-строительный факультет  
Кафедра технологии бетона и строительных материалов

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

 В.В.Тур  
«AD» 06 2024 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

 И.П.Павлова  
«AD» 06 2024 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

для специальности:  
1-70 03 01 Автомобильные дороги

Составитель: Шалобыта Т.П., доцент кафедры технологии бетона  
и строительных материалов, к.т.н., доцент

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического Совета  
университета 28.06.2024 г., протокол № 5.

*рес. н. УМК 23/24-32*

## Пояснительная записка

### *Актуальность изучения дисциплины*

Любое строительство, в том числе и дорожное, наиболее успешно может развиваться при условии повышения качества, расширения номенклатуры и снижения стоимости материалов. Получение строительных материалов – это физико-химический процесс, поэтому изучение таких процессов позволяет на новом уровне применять как традиционные материалы, так и стимулировать развитие нового в области строительного материаловедения.

### *Цель и задачи дисциплины*

Целью учебной дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» является получение комплексного представления о физико-химических процессах и основах технологии производства дорожных и строительных материалов

В задачи курса входит ознакомление студентов с современным состоянием науки и практики по вопросам повышения качества и долговечности дорожных строительных материалов; формирование представлений о структуре цементного бетона, асфальтобетона, дорожных композиционных материалов, способных противостоять различным эксплуатационным воздействиям; приобретение суммы знаний и умений, необходимых для работы в отрасли дорожного строительства. Получение и правильная эксплуатация дорожных и строительных материалов невозможна без знания физико-химических основ строения и свойств дисперсных систем, процессов твердения и формирования различных структур.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» представляет собой комплекс систематизированных учебных материалов и предназначен для подготовки студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги.

ЭУМК разработан на основании Положения об учебно-методическом комплексе на уровне высшего образования, утвержденным Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 26 июля 2011 г., №167; и предназначен для реализации требований учебной программы по учебной дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» для специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги.

### *Цели ЭУМК:*

- обеспечение качественного методического сопровождения процесса обучения будущих инженеров-строителей современным знаниям в области физико-химических и технологических процессов, систем и оборудования;
- организация эффективной самостоятельной работы студентов.

Содержание и объем ЭУМК полностью соответствуют образовательному стандарту высшего образования специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги, а также учебно-программной документации образовательных программ высшего образования. Материал представлен на требуемом методическом уровне и адаптирован к современным образовательным технологиям.

*Структура ЭУМК по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов»:*

**Теоретический раздел** ЭУМК содержит лекционный материал в соответствии с основными разделами и темами учебной программы. Лекционный материал представлен как в демонстрационном изложении, так и в виде методических указаний «Физико-химические основы технологии строительных материалов. Краткий конспект лекций для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги».

**Раздел контроля знаний** ЭУМК содержит примерный перечень вопросов для подготовки к зачету, позволяющих определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации образовательных программ высшего образования.

**Вспомогательный раздел** включает учебную программу по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов».

*Рекомендации по организации работы с ЭУМК*

Лекции проводятся с использованием представленных в ЭУМК теоретических материалов, персонального компьютера и мультимедийного проектора. ЭУМК предполагает работу студентов с демонстрационным лекционным материалом и методическими указаниями при подготовке к сдаче зачета. Кроме того, теоретический материал полезен при выполнении научно-исследовательских работ.

Необходимость составления электронного учебно-методического комплекса обусловлена возрастающей ролью самостоятельной работы студентов в процессе обучения, развитием и использованием цифровых технологий в образовании. ЭУМК позволит обеспечить более интенсивное использование лекционного времени, систематизировать самостоятельную работу студентов, повысить эффективность учебного процесса, организовать целостную систему учебно-предметной деятельности по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов», что является одним из важнейших направлений в развитии образования Республики Беларусь. ЭУМК способствует успешному усвоению студентами учебного материала посредством рационального использования свободного времени и средств цифровых технологий, что позволяет сформировать высокий уровень профессиональных компетенций будущих специалистов.

## ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ В КОМПЛЕКСЕ

### 1 Теоретический раздел

**1.1. Лекционный материал в демонстрационном изложении по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

Лекция 1. Введение

Лекция 2. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

*1. Определение дисциплины и ее связь с естественно-научными и профилирующими дисциплинами. Цели и задачи курса. Краткая история развития производства строительных материалов.*

*2. Влияние физико-химических процессов на формирование структуры и основные свойства материала. Современное состояние ДСМ.*

Лекция 3. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

*2. Классификация дисперсных систем (продолжение)*

*3. Основные свойства дисперсных систем.*

Лекция 4. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

*4. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.*

*5. Физико-химическая механика.*

Лекция 5. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

*6. Поверхностные явления. Поверхностная энергия.*

*7. Смачиваемость.*

*8. Адгезия и когезия.*

*9. Адсорбция.*

Лекция 6. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

*10. Поверхностно-активные вещества.*

*11. Основы реологии. Понятие о прочности композиционных строительных материалов.*

Лекция 7. Теоретические основы бетоноведения.

*1. Физико-химические основы материаловедения и технологии материалов на неорганических вяжущих.*

*2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения.*

Лекция 8. Теоретические основы бетоноведения.

*2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения (продолжение).*

*3. Явление адсорбции.*

Лекция 9. Теоретические основы бетоноведения.

*4. Основные положения теории двойного электрического слоя.*

*5. Коррозия и защита бетона.*

Лекция 10. Теоретические основы бетоноведения.

*6. Совершенствование технологии цементобетона.*

Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

*1. Влияние технологии получения на свойства битумных вяжущих.*

Лекция 11. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

*2. Асфальтобетоны.*

*3. Общая характеристика и структура. Распределение битума в асфальтобетоне.*

Лекция 12. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

*4. Структурные особенности и свойства АБ.*

*5. Характеристики асфальтобетонного покрытия.*

Лекция 13. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

*6. Релаксация и устойчивость АБ к атмосферным воздействиям.*

*7. Регенерация АБ.*

*8. Активационные технологии.*

Лекция 14. Дорожно-композиционные материалы.

*1. Основные понятия о формировании структуры ДКМ.*

*2. Асфальтоцементные композиции.*

Лекция 15. Дорожно-композиционные материалы.

*3. Общая рабочая теория активационно-технологической механики битумно-минеральных композиций (теория перколяции).*

*4. Применение бетонов на ОГВ.*

Лекция 16. Основные методы исследования и контроля качества строительных материалов и изделий.

*1. Методы исследования строительных материалов.*

*2. Системы контроля качества промышленной продукции.*

**1.2. Методические указания «Физико-химические основы технологии строительных материалов. Краткий конспект лекций для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги»**

**2 Раздел контроля знаний**

**Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

**3 Вспомогательный раздел**

**Учебная программа по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

## **1 Теоретический раздел**

**1.1. Лекционный материал в демонстрационном изложении по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

**1.2. Методические указания «Физико-химические основы технологии строительных материалов. Краткий конспект лекций для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги»**

## Лекция 1. Введение.

1. Определение дисциплины и ее связь с естественно-научными и профилирующими дисциплинами. Цели и задачи курса. Краткая история развития производства строительных материалов.

2. Влияние физико-химических процессов на формирование структуры и основные свойства материала. Современное состояние ДСМ.

1. *Определение дисциплины и ее связь с естественно-научными и профилирующими дисциплинами учебного плана. Цели и задачи курса. Краткая история развития производства строительных материалов.*

Современная культура, существование человечества базируются на использовании технологий. Добыча и переработка полезных ископаемых и пищевых продуктов, резание, точение, плавление, полировка – без технологических процессов не обходится ни энергетика, ни пищевая промышленность, ни электроника, ни медицина, ни другие отрасли жизнеобеспечения человека. Одна из важнейших отраслей – строительная, развивается в направлении создания новых высокоэффективных материалов, технологий, оборудования на основе физико-химических законов, определяющих структуру и свойства материалов в условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений.



Целью учебной дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» является получение комплексного представления о физико-химических основах технологии производства дорожных и строительных материалов. Так как прогресс в технологии производства и устройства дорожных покрытий тесно связан с физико-химическими представлениями, то физическая химия и физико-химическая механика в дорожном и строительном материаловедении являются теоретической основой технологии дисперсных строительных материалов.

История развития наук о строительных материалах и технологиях уходит в далекое прошлое. Первый этап (до 1-й пол. XIX в.) является наиболее длительным по времени. Исходной точкой отсчета начала развития признан момент получения керамики путем осознанного изменения структуры глины при ее обжиге.

Второй этап (2-я пол. XIX в. – 1-я пол. XX в) характеризуется созданием новых материалов и их массовым производством, основанным на бурном развитии технологий, промышленности, строительством многочисленных инженерных сооружений.

Третий этап развития науки о строительных материалах и технологиях охватывает современный период, начавшийся со 2-й половины XX в. Для него характерны следующие особенности:

1) дальнейшее расширение объема производства традиционных и появление новых материалов; при этом наблюдается возросший уровень теоретических исследований применительно к конкретному виду материалов и технологий;

2) интеграция научных знаний о строительных материалах и технологиях.

**Физическая химия** – наука, изучающая взаимосвязь физических и химических явлений. Используя теоретические и экспериментальные методы обеих наук, а также собственно физико-химические методы, она позволяет охватить исследуемые явления с нескольких сторон. Основная задача физической химии – предсказание направления химических процессов, характера их протекания во времени и конечных результатов при различных условиях проведения.

**Физико-химическая механика**, (основоположник – академик П.А. Ребиндер), сложилась как наука о явлениях и закономерностях, происходящих в технологических процессах, и объединила пространства научных исследований и технологических регламентов.



Рисунок 1 – Строительные и дорожные материалы

*2. Влияние физико-химических процессов на формирование структуры и основные свойства материала. Современное состояние ДСМ.*

Технология – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Задача технологии как науки – выявление физических, химических, механических и других закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных производственных процессов.

Основными элементами технологического процесса являются сырье, энергия и аппаратура (оборудование). Они тесно связаны между собой, взаимно обуславливают друг друга и зависят от состояния экономики и научно-технического прогресса в отрасли.

**Сырье** - исходные вещества или смеси из нескольких компонентов (сырьевые смеси), которые поступают в переработку для получения продукции.



Рисунок 2 – Сырьевые материалы

**Структура** (от лат. structura — строение, расположение, порядок) — взаимное расположение и связь составных частей (элементов) или внутреннее устройство материала или какой-либо другой целостной материальной системы (атома, молекулы, материала и т.д.).

**Свойство** материала – это его способность определенным образом реагировать на те или иные внешние или внутренние факторы. Действие этих факторов обусловлено как составом и строением самого материала, так и эксплуатационными условиями, в которых работает материал в сооружении.

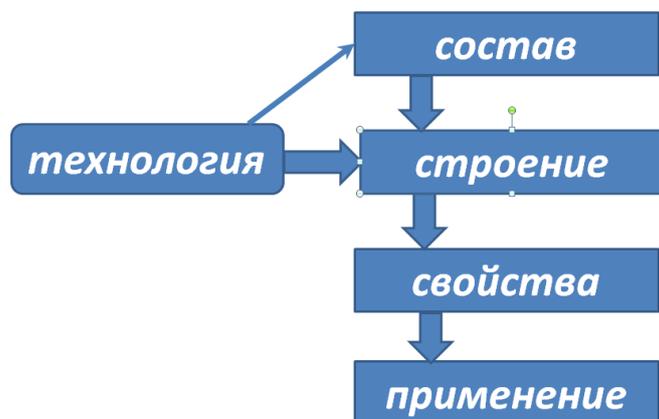


Рисунок 3 – Схема изучения дорожных и строительных материалов

Операции, предопределяющие процессы структурообразования:

- **основные** – подготовительные работы, перемешивание отдозированных сырьевых компонентов, формирование получаемой смеси (массы) и уплотнение отформованных изделий, специальная обработка уплотненных изделий до полного их отвердевания, технический контроль качества готовой продукции;

- **вспомогательные** – контроль за кондицией технического регламента, транспортирование сырья и перемешанной смеси (массы), перемещение готовых изделий, складирование сырья и готовой продукции, хранение материалов на складах.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 2. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

1. [Дисперсные системы: основные понятия.](#)
2. [Классификация дисперсных систем.](#)

### 1. Дисперсные системы: основные понятия.

Дисперсные системы широко распространены в природе и играют важную практическую роль, чем и определяется не только научное, но и народнохозяйственное значение коллоидной и физической химии. Природные воды, облака, дым, почва, глина – все это примеры природных дисперсных систем.

*Дисперсная система* – это система, в которой большая совокупность мелких частиц одного или нескольких веществ равномерно распределены между частицами другого вещества.

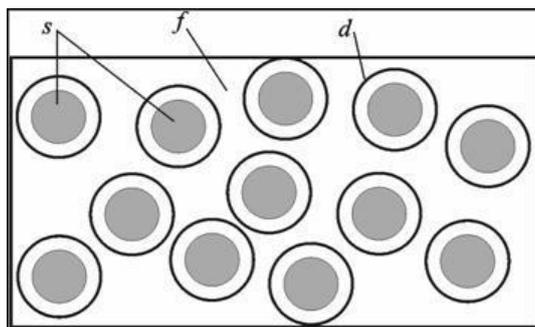


Рисунок 4 – Дисперсная система

Частицы дисперсной фазы *s* (в виде мелких твердых частичек, кристалликов, капель жидкости, пузырьков газа, ассоциатов молекул или ионов), обладающие адсорбционным слоем *d*, распределены в однородной непрерывной дисперсионной среде *f*.

*Дисперсной фазой* называют мелкие частицы вещества, которое распределено в системе. *Дисперсионной средой* называют вещество, в котором распределена дисперсная фаза. Дисперсная система может быть гомогенной и гетерогенной.

Важной характеристикой дисперсных систем есть степень измельчения частиц дисперсной фазы или степень дисперсности (*D*) – это величина, обратная размеру частицы (*d*) – мера раздробленности вещества

$$D = 1/d, \text{ м}^{-1}$$

Величина удельной поверхности

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{m}, \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}, \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$$

Из уравнения следует, что чем меньше размер частиц, тем больше степень дисперсности системы (высокодисперсные системы) и, наоборот, чем больше размер частиц, тем меньше степень дисперсности (низкодисперсные системы). Если в системе частицы сильно различаются по размерам, то система – полидисперсна. От дисперсности частиц зависят многие свойства дисперсных систем, например, их устойчивость, оптические свойства, осмотическое давление, седиментация и т.д.

## 2. Классификация дисперсных систем.

### Классификация реальных систем по степени дисперсности.

*Грубодисперсные системы* – это дисперсные системы с размером частиц  $10^{-4} \dots 10^{-7}$  м. *Коллоидно-дисперсные системы* с размером частиц от  $10^{-7} \dots 10^{-9}$  м (1 – 100 нм). Коллоидно-дисперсные системы с твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой (Т/Ж) часто называют *коллоидными растворами* (*гидрозоли* или просто *золи*, если дисперсионной средой является вода).

*Молекулярные и ионные растворы* с размером частиц менее  $10^{-9}$  м.

Свойства систем существенно отличаются в зависимости от размера составляющих их частиц, однако в основу классификации положены не только дисперсность, но и свойства этих систем (таблица 1).

Таблица 1– Свойства систем различной степени дисперсности

Грубодисперсные системы	Коллоидно-дисперсные системы	Молекулярные и ионные (истинные) растворы
Гетерогенные	Гетерогенные	Гомогенные
Термодинамически неустойчивы	Термодинамически неустойчивы, но устойчивы кинетически	Термодинамически устойчивы
Стареют со временем	Стареют со временем	Не стареют
Частицы не проходят через бумажный фильтр	Частицы проходят через бумажный фильтр	Частицы проходят через бумажный фильтр
Частицы не проходят через ультрафильтры (мембраны, целлофан)	Частицы не проходят через ультрафильтры (мембраны, целлофан)	Частицы проходят через ультрафильтры (мембраны, целлофан)
Отражают свет, поэтому непрозрачны	Прозрачные, но рассеивают свет, поэтому опалесцирующие и дают конус Тиндаля	Прозрачные, неопалесцирующие, конус Тиндаля не наблюдается
Частицы видны в оптическом микроскопе	Частицы видны в электронном микроскопе, в ультрамикроскопе	Частицы не видны в современных микроскопах

Классификация по агрегатному состоянию. В зависимости от агрегатного состояния дисперсной фазы и дисперсионной среды все дисперсные системы можно разделить на 8 типов. Так как необходимым условием образования дисперсной системы является гетерогенность системы (ограниченная растворимость дисперсной фазы в дисперсионной среде), то система типа "газ в газе" не включается в данную классификацию вследствие их неограниченной растворимости друг в друге (таблица 2).

Если дисперсионной средой является жидкость, а дисперсной фазой – твердые частицы, система называется взвесью или *суспензией*; если дисперсная фаза представляет собой капельки жидкости, то систему называют *эмульсией*. Эмульсии, в свою очередь, подразделяют на два типа: *прямые*, или "*масло в воде*" (когда дисперсная фаза – неполярная жидкость, а дисперсионная среда – полярная жидкость) и *обратные*, или "*вода в масле*" (когда полярная жидкость диспергирована в неполярной). Среди дисперсных систем выделяют также *пены* (газ диспергирован в жидкости) и *пористые тела* (твердая фаза, в которой диспергированы газ либо жидкость).

Таблица 2 – Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию

Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Условное обозначение	Примеры дисперсных систем	
Жидкость	Газ	ж/г	Туман, облака, жидкие аэрозоли	
Твердое тело	Газ	т/г	Дым, пыль, твердые аэрозоли, порошки	
Газ	Жидкость	г/ж	Пены, газовые эмульсии	
Жидкость	Жидкость	ж/ж	Эмульсии (молоко, латекс)	
Твердое тело	Жидкость	т/ж	Суспензии, коллоидные растворы, гели, пасты, глины	
Газ	Твердое тело	г/т	Твердые пены, пористые тела (пенопласты, силикагель, пемза)	
Жидкость	Твердое тело	ж/т	Жемчуг, опал, грунт	
Твердое тело	Твердое тело	т/т	Цветные стекла, сплавы, сталь, бетон	

[Вернуться в оглавление](#)

### Лекция 3. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

2. [Классификация дисперсных систем \(продолжение\)](#)
3. [Основные свойства дисперсных систем.](#)

#### 2. Классификация дисперсных систем (продолжение)

##### Классификация по межфазовому взаимодействию.

Коллоидные системы (*эмульсии, цементные, известковые растворы*), в свою очередь, подразделяются на две группы, резко отличные по характеру взаимодействий между частицами дисперсной фазы и дисперсионной среды:

а) *лиофобные* (золи) это системы, в которых слабые силы межмолекулярного взаимодействия. К ним принадлежат лиозоли, аэрозоли, эмульсии, пены. Лиофобные золи это коллоидные растворы. Эти системы могут быть получены только с затратой энергии и устойчивы лишь в присутствии стабилизаторов.

б) *лиофильные* это системы, в которых интенсивное взаимодействие между фазой и средой. К ним принадлежат растворы высокомолекулярных соединений, ВМС которые ранее называли *лиофильными коллоидами*. Растворы ВМС образуются самопроизвольно благодаря сильному взаимодействию частиц дисперсной фазы с дисперсионной средой и способны сохранять устойчивость без стабилизаторов.

##### Классификация по кинетическим свойствам дисперсной фазы.

Согласно этой классификации все дисперсные системы можно разделить на два класса: *свободнодисперсные системы* и *связнодисперсные системы*.

К *свободнодисперсным* системам относятся бесструктурные системы, в которых частицы дисперсной фазы не связаны друг с другом и способны независимо перемещаться в дисперсионной среде под влиянием теплового движения или силы тяжести. К ним относятся лиозоли, аэрозоли, достаточно разбавленные суспензии и эмульсии.

К *связнодисперсным* системам относятся системы, в которых частицы связаны друг с другом за счет молекулярных сил, образуя в дисперсионной среде своеобразные пространственные сетки (структуры). Такие частицы, не способны перемещаться, а могут лишь совершать колебательные движения. Это образованные из зелей гели, концентрированные суспензии (пасты) и концентрированные аэрозоли.

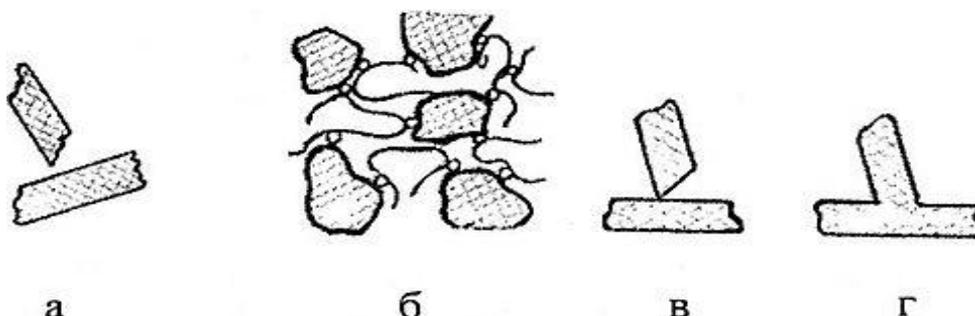
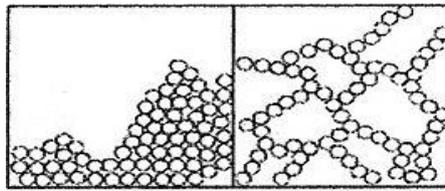


Рисунок 5 - Виды контактов в пространственных дисперсных структурах  
а, б- коагуляционные с низкомолекулярными сольватными (а) и высокомолекулярными (б) слоями;  
в - точечные контакты;  
г - фазовые контакты



а б  
Рисунок 6 - Связнодисперсные системы коагулят с плотной (а) и рыхлой (б) «арочной» структурой

### 3. Основные свойства дисперсных систем.

*Броуновское движение* проявляется хаотическим непрерывным движением частиц дисперсной фазы под действием ударов молекул растворителя (дисперсионной среды), находящихся в состоянии интенсивного молекулярно-теплового движения. Перемещаться частицы могут в различных направлениях. Траектория их движения представляет собой ломаную линию неопределенной конфигурации.

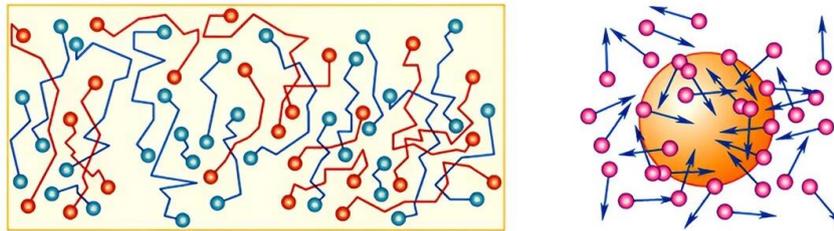


Рисунок 7 –Броуновское движение

*Диффузия* – это самопроизвольно протекающий процесс выравнивания концентраций ионов, молекул или коллоидных частиц вследствие их беспорядочного теплового (для истинных растворов) или броуновского (для дисперсных систем) движения. Диффузия заканчивается с достижением равномерного распределения частиц по всему объему.

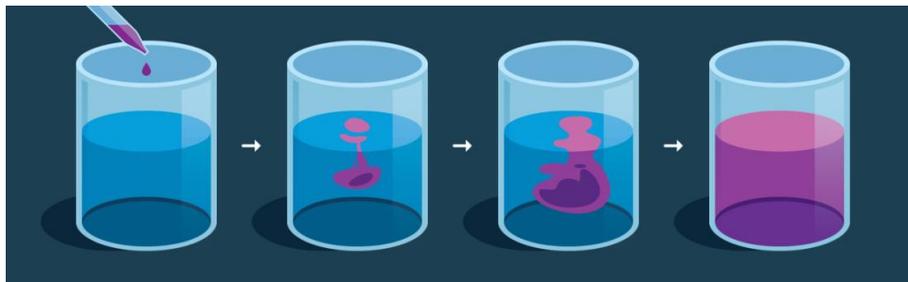


Рисунок 8 - Диффузия

1-й закон Фика (одномерная стационарная диффузия)

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

2-й закон Фика (одномерная нестационарная диффузия)

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}$$

Закон Стокса

$$B = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r$$

Уравнение Эйнштейна-Смолуховского

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot \tau}{3 \cdot \pi \cdot N_A \cdot \eta \cdot r}}$$

**Осмотическое давление** – избыточное гидростатическое давление на раствор, отделённый от чистого растворителя полупроницаемой мембраной, при котором прекращается диффузия растворителя через мембрану. Зависит от количества свободно движущихся частиц. Осмотическое давление коллоидных растворов ничтожно мало по сравнению с таковым в истинных растворах. Второй особенностью осмотического давления коллоидных растворов является его непостоянство. В связи с термодинамической неустойчивостью коллоидных растворов в них непрерывно протекают процессы агрегации и дезагрегации, приводящие к изменению числа осмотически активных частиц в единице объема, и следовательно, осмотического давления.

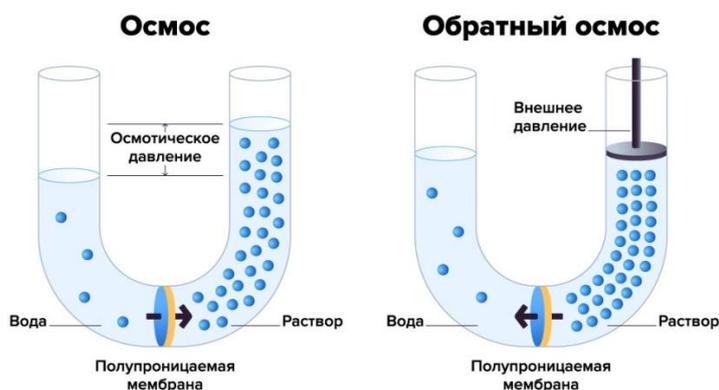


Рисунок 9 –Осмотическое давление

**Седиментация** – это самопроизвольное оседание частиц под действием силы тяжести. В свободнодисперсных системах частицы вещества, диспергированные в дисперсионной среде, находятся под действием двух противоположно направленных сил: силы тяжести и сил диффузии. В истинных растворах ввиду малой массы их частиц (молекул, ионов, атомов) силы диффузии преобладают над силами тяжести, происходит выравнивание концентраций по всему объему системы. В грубодисперсных системах, где размер частиц довольно велик, сила тяжести значительно больше сил диффузии, что способствует осаждению и концентрированию частиц на дне сосуда. Если при достижении равновесия основная масса частиц дисперсной фазы за сравнительно короткое время окажется в осадке (или всплывет), систему считают кинетически (седиментационно) неустойчивой. Это характерно для грубодисперсных систем (суспензий, эмульсий и т.п.). Если же частицы в основном остаются во взвешенном состоянии, система является кинетически устойчивой. К таким системам относятся коллоидные растворы (золи). В коллоидных растворах между силами тяжести и силами диффузии устанавливается седиментационное равновесие.

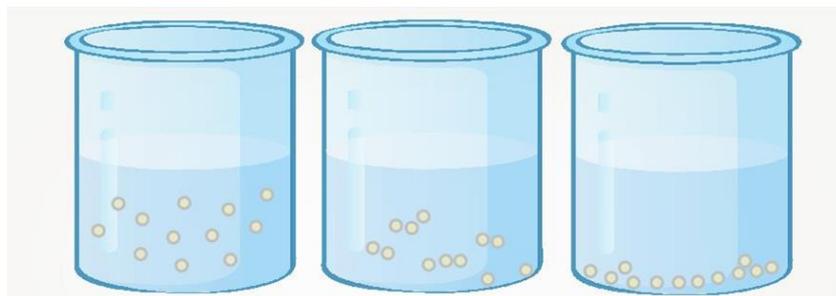


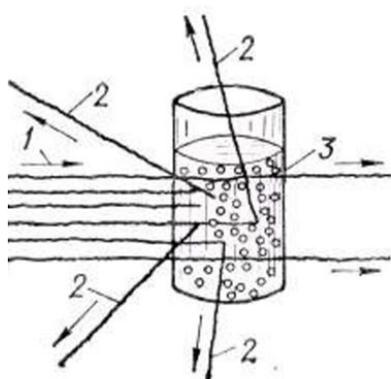
Рисунок 10 -Седиментация

Специфика **оптических** свойств дисперсных систем обусловлена их основными признаками: гетерогенностью и дисперсностью.

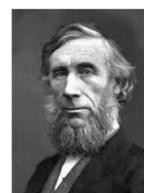


Дисперсные системы неоднородны по фазовому составу, поэтому для них характерна оптическая неоднородность. Прохождение света через дисперсную систему сопровождается такими явлениями, как его преломление, поглощение, отражение и рассеяние. Преобладание одного из этих явлений зависит главным образом от соотношения между длиной волны падающего света и размером взвешенных частиц. В грубодисперсных системах размер частиц превышает длину волны видимой части спектра, что способствует отражению света от поверхности частиц. Поэтому данные растворы мутные (непрозрачные). В истинных растворах размеры частиц растворенного вещества (молекулы, ионы, атомы) значительно меньше длины волны. Такие растворы оптически пусты (прозрачные).

В высокодисперсных системах (коллоидных растворах) размер частиц соизмерим с длиной волны видимого света, в результате чего в таких растворах преобладает светорассеяние. Для коллоидных неокрашенных растворов светорассеяние проявляется в виде *опалесценции*, т.е. свечения матового цвета, чаще всего голубоватых оттенков. Благодаря светорассеянию коллоидные растворы можно легко отличить от молекулярных и ионных.



Коллоидный раствор рассеивает свет      Истинный раствор пропускает свет



Джон Тиндаль (1820-1893)

Рисунок 11 – Оптические свойства

1-проходящий свет, 2-отраженный свет, 3-сосуд с раствором

[Вернуться в оглавление](#)

**Лекция 4.** Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

[4. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.](#)

[5. Физико-химическая механика.](#)

**4. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.**

В технологии строительных материалов основной задачей является создание различными способами (методами) оптимальных структур, обеспечивающих требуемые свойства и долговечность данного материала. Согласно теории устойчивости лиофобных коллоидов ДЛФО (Дерягина-Ландау-Фейрвея-Овербека) характер взаимодействия частиц дисперсной фазы непосредственно отражает устойчивость дисперсных систем и закономерности их коагуляции.



Строительные и дорожные материалы (бетоны, известь, гипс, цемент, керамика и т.д. – это в основном грубодисперсные системы с размером частичек более  $10^{-9}$  м. Для них Ребиндером П.А. определены основные типы пространственных структур – *коагуляционные* и *конденсационные (конденсационно-кристаллизационные)*.

В коагуляционных структурах контакт между частицами осуществляется через тонкие прослойки дисперсионной среды и точечные контакты или при участии макромолекул. Конденсационные структуры возникают путём склеивания, сваривания, срастания частиц дисперсной фазы на отдельных участках поверхности. В коллоидном растворе в начале коагуляционного взаимодействия агрегаты из двух, трех (а иногда и целой цепочки) первичных дисперсных частиц – сохраняют текучесть (скрытая коагуляция) до образования сетки. Но уже дальнейший рост агрегатов приводит к образованию коагулята (седимента) или геля. Возникает твердообразная коагуляционная структура, которая может быть плотной или рыхлой.

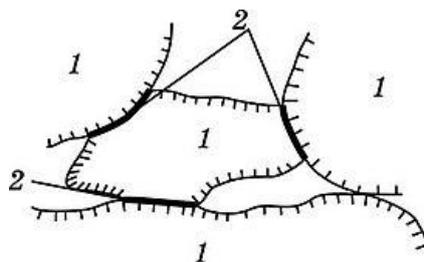


Рисунок 12 - Схема коагуляционной структуры материала:

1 - частицы;

2 - контакты (прослойки жидкофазной среды)

Свежевозникшие коагуляты во многих случаях часто переходят в состояние золя. Изотермический переход коагулята в золь называется *пептизацией*, а вызывающие его вещества - пептизаторами. Пептизаторы ионной (электролиты) и молекулярной природы стабилизируют дисперсные системы и, адсорбируясь на поверхности первичных частиц, ослабляют взаимодействие между ними, приводя к распаду агрегатов, и коагуляты переходят в золь. Со временем пептизируемость коагулятов в результате развития точечных контактов между первичными частицами уменьшается, происходит упрочнение коагуляционных структур или так называемое старение коллоидов. Проявляется оно в агрегации частиц дисперсной фазы, в уменьшении их числа и степени гидратации, в уменьшении поверхности раздела между фазами и адсорбционной способности. Прочность коагуляционных структур незначительна, так как сетчатый каркас из дисперсных частиц удерживается за счет межмолекулярных сил, которые невелики.

Для коагуляционных структур характерно явления *тиксотропии* и *синерезиса*. Кроме того, для них характерно старение (или «созревание») во времени, которое проявляется в постепенном упрочнении структуры, ее сжатии и высвобождении части жидкости из структурной сетки, что может привести к своеобразному разделению системы на две фазы.

Способность системы к произвольному восстановлению структуры во времени после ее механического разрушения называют тиксотропией (*thixis* – прикосновение, *trope* – поворот, изменение). Иначе тиксотропию можно охарактеризовать как обратимый переход золь↔гель. Явление самопроизвольного уменьшения размеров геля или студней за счет выделения жидкой среды, содержащейся в коагуляционной структуре, называется синерезисом (*synáiresis* – сжатие, уменьшение).

Конденсационные дисперсные структуры в зависимости от механизма возникновения фазового контакта разделяют на: структуры спекания (срастания) и кристаллизационные структуры твердения. Структуры спекания возникают в результате сварки, сплавления, спекания или склеивания дисперсных частиц в точках касания. Они получаются при термической обработке, когда частицы дисперсной фазы «свариваются» по местам точечных контактов. Таким образом, конденсационная структура представляет собой непрерывные каркасы дисперсной фазы и дисперсионной среды, вдвинутые друг в друга и не потерявшие дисперсности. Однако она может быть получена и при конденсации дисперсной фазы из пересыщенных растворов или расплавов. При образовании и росте зародышей новой фазы из концентрированных пересыщенных систем может возникнуть непрерывный сетчатый каркас путем срастания и переплетения растущих частиц дисперсной фазы. Если эти частицы представляют собой кристаллы, то возникающие структуры называют кристаллизационно-конденсационными структурами твердения. Сцепление элементов конденсационных структур дополняется образованием химических связей, что обуславливает значительную их прочность. Конденсационные структуры не тиксотропны и не пластичны, это упруго-хрупкие, необратимо разрушаемые структуры, в отличие от тиксотропно-обратимых коагуляционных структур.



Рисунок 13 - Типы структур и контактов в дисперсных системах

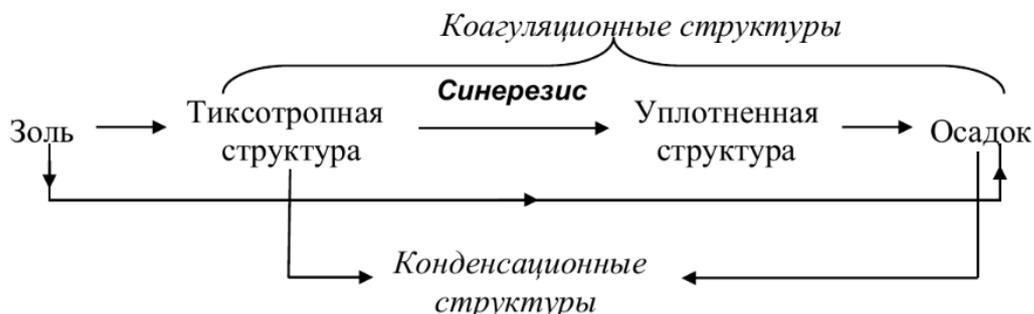


Рисунок 14 - Процесс старения коллоидной системы

### 5. Физико-химическая механика в дисперсных системах.

Физико-химическая механика – это наука о закономерностях формирования структур в разных дисперсных системах и материалах, устанавливаемых путем изучения механизма молекулярно-поверхностных явлений в процессе образования и разрушения этих структур. Знание закономерностей формирования структур позволяет получать материалы с заданными свойствами с помощью технологических процессов переработки разнообразных веществ и материалов, применяемых в качестве исходного сырья.

Основное требование, предъявляемое к любым материалам: они должны обладать высокими структурно-механическими характеристиками, определяющими их долговечность и надежную работу в инженерной конструкции. Это достигается при максимальном приближении их прочности к прочности бездефектного твердого тела. Одной из основных причин значительного различия (часто на несколько порядков) в свойствах бездефектных твердых тел и реальных дисперсных материалов является несовершенство технологических процессов получения последних. Это относится к процессам обработки поверхности частиц исходных компонентов, их смешения (гомогенизации), транспортирования и уплотнения смеси.

Появление в структуре микронеоднородностей различных видов, стимулирующих разрушение материалов даже при пониженных напряжениях, во многом объясняется именно несовершенством технологии и является следствием определенных особенностей высококонцентрированных дисперсных систем. Основные из них проявляются в сочетании сильно развитой межфазной поверхности и большой концентрации дисперсной фазы в жидкой дисперсионной среде. Главное следствие такого сочетания заключается в том, что в концентрированных системах

самопроизвольно, за счет сцепления частиц дисперсных фаз между собой, возникают термодинамически устойчивые пространственные структуры. В таких системах доминирующим является соотношение между потенциальной энергией взаимодействия (сцепления) частиц и кинетической энергией, передаваемой этим частицам в процессе технологического передела. Методика исследования высококонцентрированных дисперсных систем предусматривает, прежде всего, изучение закономерностей образования и разрушения пространственных структур дисперсных систем при воздействии на них энергетических факторов внешней среды. При исследовании структурно-механических свойств дисперсных систем на первый план выдвигается не классическая реология, главная задача которой – изучение реологических свойств систем и влияния на них отдельных факторов, а управляющая реология, требующая обоснования такого сочетания различных видов воздействий, при котором обеспечивается заданный оптимальный уровень структурно-реологических характеристик системы в течение всего технологического процесса.

Таким образом, физико-химическая механика позволяет анализировать процессы образования и разрушения структуры материалов и целенаправленно управлять ими. Она является основой современного материаловедения и технологических процессов, используемых при переработке исходного сырья и получении готовых материалов в виде сложных дисперсных систем.



Петр Александрович Ребиндер

*«Перед химической наукой стоят две равноправные задачи: во-первых, получение новых веществ (синтез или извлечение веществ из природных источников) и, во-вторых, их переработка в материалы и изделия для строительства, техники, научных целей, бытовых нужд и т.д. Можно получить очень много ценных веществ и не суметь их переработать в материалы - основу нашего технического прогресса. Вот эту, вторую, задачу и помогает решать физико-химическая механика...»*

**Эффект Ребиндера** кратко можно сформулировать следующим образом: **понижение прочности твердых тел в адсорбционно-активной среде вследствие физического и химического взаимодействия в поверхностном слое.**

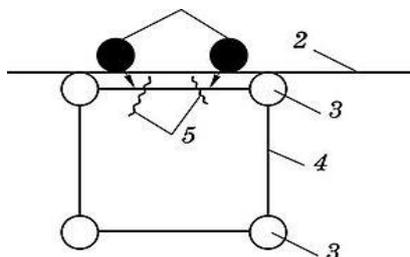


Рисунок 15 - Схема ослабления связи между атомами кристаллической решетки твердого тела адсорбирующимися молекулами ПАВ  
 1 - молекулы ПАВ;  
 2 - грань кристалла твердого тела;  
 3 - узлы кристаллической решетки;  
 4 - связь между узлами кристаллической решетки;  
 5 - места разрыва связи в кристаллической решетке

[Вернуться в оглавление](#)

**Лекция 5. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.**

6. [Поверхностные явления. Поверхностная энергия.](#)
7. [Смачиваемость.](#)
8. [Адгезия и когезия.](#)
9. [Адсорбция.](#)

6. Поверхностные явления. Поверхностная энергия.

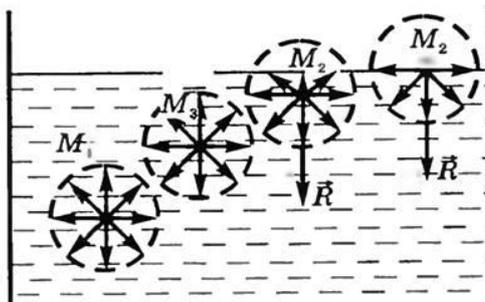


Рисунок 16 - Силы, действующие на молекулу в объеме и на поверхности жидкости

Для увеличения поверхности жидкости нужно преодолеть силу внутреннего давления, т.е. совершить определенную механическую работу. Чем больше площадь поверхности жидкости  $S$ , тем большую работу (энергию) надо совершить (затратить). Эта энергия  $E_{\Gamma}$  называется *поверхностной энергией Гиббса*:

$$E_{\Gamma} = \sigma \cdot S,$$

где  $S$  – удельная поверхность;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, т.е. удельная работа, затраченная на образование поверхности раздела фаз.

Коэффициент *поверхностного натяжения* (или просто *поверхностное натяжение*) может иметь силовое и энергетическое выражение. С одной стороны *поверхностное натяжение* – это *поверхностная энергия Гиббса единицы поверхности* (т.е. *удельная поверхностная энергия Гиббса*). Следовательно, она равна работе, затраченной на образование единицы площади поверхности. Единица измерения в этом случае – джоуль на квадратный метр ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ). Силовое определение *поверхностного натяжения* формулируется следующим образом: сила, действующая на поверхности тела по касательной к ней и стремящаяся сократить свободную поверхность тела до наименьших возможных пределов при данном объеме. В этом случае единицей измерения является ньютон на метр ( $\text{Н}/\text{м}$ ).

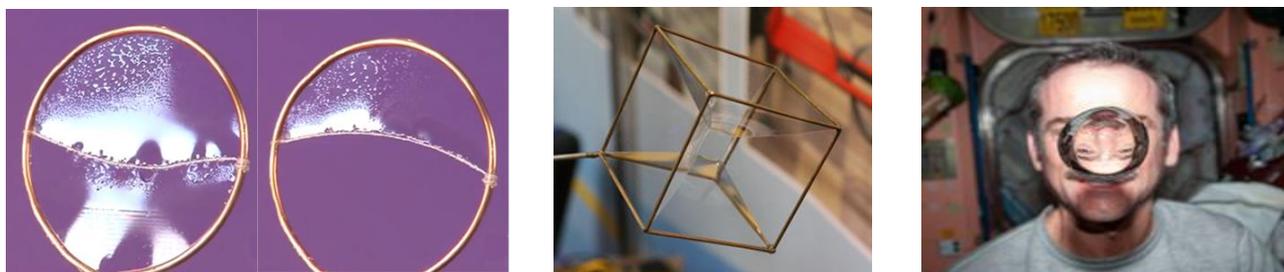


Рисунок 17 – Поверхностные явления

С увеличением температуры наблюдается уменьшение *поверхностного натяжения* за счет ослабления молекулярных сил, в результате чего молекулы *поверхностного слоя* отрываются (процессы кипения, испарения). Стремление к уменьшению поверхности наблюдается и у твердых тел. В природе металлов и твердых тел границы зерен обладают избытком свободной энергии вследствие

нарушения структуры, что очень важно для процессов смачивания, адсорбции, разрушения и деформации.

Для дисперсных систем одной из основных характеристик является удельная поверхность частиц, которая может быть определена на специальных устройствах. *Удельная поверхность* – это сумма всех поверхностей  $S$  такого числа частиц, общий объем  $V$  которых равен  $1 \text{ см}^3$ . Таким образом, с увеличением размера частиц удельная поверхность уменьшается и наоборот. При дальнейшем дроблении дисперсной части исчезает поверхность раздела между частицей и средой и образуется гомогенная система (молекулярная смесь или истинный раствор). Явления, происходящие на поверхности раздела фаз имеют огромное значение, на них основаны такие процессы, как: обогащение руд, смазка, поглощение вредных газов, смачивание твердой поверхности и др.

Таблица 3 – Поверхностное натяжение

<i>Вещество</i>	$\sigma, \text{мДж/м}^2$	<i>Вещество</i>	$\sigma, \text{мДж/м}^2$
Жидкость		Твердые тела	
Гексан	18,4		
Октан	21,8		
Этанол	22,0		
Бензин	25,0		
Бензол	28,2		
Уксусная кислота	27,8		
Муравьиная кислота	36,6		
Анилин	43,2	Полимеры	
Вода	71,95	Политетрафторэтилен	18,5
Ртуть	473,5	Полиэтилон	31,0
Жидкость – жидкость		Полистирол	33,0
Бензол – вода	34,4	Поливинилхлорид	40,0
Анилин – вода	4,8	Плексиглас	38,0
Хлороформ – вода	33,8	Эмаль К-2	31,7

**Правило Ребиндера** определяет влияние природы граничащих фаз:

**Чем больше разность полярностей ( $\Delta P$ ) фаз, тем сильнее поверхностное натяжение на границе их раздела.**

### 7. Смачиваемость.

Поверхностное натяжение твердого тела непосредственно измерить невозможно, но всегда поверхностное натяжение твердого тела значительно больше, чем поверхностное натяжение жидкости. На этом основан процесс *смачивания* – один из основных процессов получения дорожных строительных материалов. Приготовление широко распространенных строительных материалов (цементо- и асфальтобетонов, керамики, пластмасс, мастик) обязательно включает важную технологическую операцию - покрытие твердой фазы (частиц минеральных материалов) жидкой дисперсной средой (водой, битумом, полимером, эмульсией). Это делается для придания системе подвижности и осуществления формования изделия. В отдельных случаях создания каркасных материалов или защиты бетонных и каменных конструкций от коррозии широко используют пропитывание пористых материалов специальными жидкостями. В обоих случаях происходит *смачивание*. Мерой смачивания является *краевой угол смачивания*  $\theta$ , образующийся между касательной к поверхности жидкости.

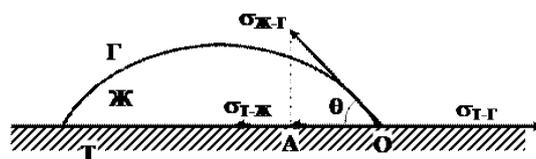


Рисунок 18 – Краевой угол смачивания при равновесном контактом смачивании

Краевой угол отсчитывается в сторону жидкости. Условие равновесия капли на твердой поверхности при контактом смачивании определяется соотношением поверхностного натяжения на трех границах фаз (жидкой, твердой, твердожидкой) согласно уравнению Юнга:

$$\sigma_{ТГ} = \sigma_{ТЖ} + \sigma_{ЖГ} \cdot \cos\theta,$$

где  $\sigma_{ТГ}$  – поверхностное натяжение на поверхности раздела фазы твердое тело-газ;  
 $\sigma_{ТЖ}$  – поверхностное натяжение твердожидкой фазы;  
 $\sigma_{ЖГ}$  – поверхностное натяжение на поверхности фазы жидкость-газ;  
 $\cos\theta$  – косинус краевого угла смачивания.

Краевой угол смачивания острый – поверхность *гидрофильная*, краевой угол смачивания тупой, косинус угла меньше 0, но больше 1 – поверхность *гидрофобная*. По числу фаз, участвующих в процессе, различают два типа смачивания: *иммерсионное смачивание*, когда твердое тело полностью погружается в жидкость, и *контактное смачивание*, которое протекает с участием трех фаз: твердой, жидкой и газообразной (например, капля жидкости на твердой поверхности).

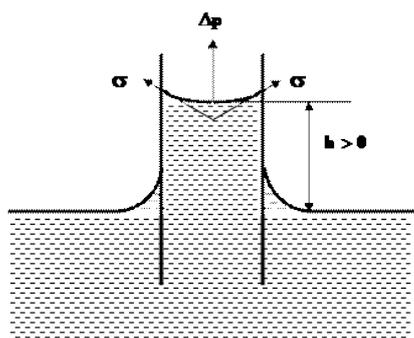


Рисунок 19 – Капиллярное поднятие жидкости ( $\Theta < 90^\circ$ )

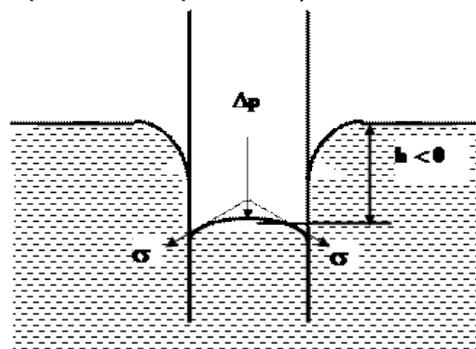


Рисунок 20 – Отрицательное капиллярное поднятие жидкости ( $\Theta > 90^\circ$ )

*Капилляры* — узкие трубки, диаметр которых во много раз меньше их длины  
*Мениск* (греч. meniskos – лунный серп) – изогнутая поверхность жидкости

### 8. Адгезия и когезия.

*Когезией* называют притяжение однородных молекул, атомов или ионов, обусловленное всеми видами межмолекулярного и межатомного взаимодействия внутри одной фазы. Простейший пример когезии – прочность однородных веществ в жидком состоянии (битум, деготь, полимер) или в виде твердого тела (прочность асфальтобетона). Таким образом, когезия определяет существование вещества в твердом и жидком состояниях, которые характеризуются высокой когезией. Газообразные вещества обладают малой когезией.

*Адгезия* – слипание разнородных молекул твердых или жидких тел. Адгезия является причиной склеивания двух разных веществ за счет действия физических или химических межмолекулярных сил.

Работа когезии равна энергии, которую нужно затратить на преодоление сил сцепления между молекулами данной фазы. Численно работа когезии ( $\text{Дж/м}^2$ ) равна удвоенному значению поверхностного натяжения:

$$W_k = 2\sigma.$$

Работа адгезии – это работа, затрачиваемая на отрыв молекул одной фазы от молекул другой фазы. По величине работы адгезии можно прогнозировать прочность адгезионной связи (прилипания, склеивания). Работу адгезии также выражают в Дж/м<sup>2</sup>. Формой адгезии является смачиваемость, т.е. способность прилипания жидкости к твердому телу. При разрыве образуются две поверхности и исчезают фазовые границы, что согласуется с законом Дюпре. Для случая адгезии в системе твердое тело-жидкость, уравнение имеет вид:

$$W_a = \sigma_{тж}(1+\cos\theta).$$



Рисунок 21 –Схема образования новых поверхностей за счет преодоления сил когезии (а), сил адгезии (б)

Работа адгезии тем больше, чем сильнее молекулярное притяжение жидкости к твердой поверхности, т.е. лучше смачивание. Если работа адгезии меньше половины работы когезии, то жидкость не смачивает твердую поверхность.

### 9. Адсорбция.

Процессы поглощения газов или растворенных веществ твердыми материалами и жидкостями называются *адсорбцией*. Это поверхностный процесс, заключающийся во взаимодействии молекул или ионов адсорбата (газа или растворенного вещества) с поверхностью адсорбента за счет сил Ван-дер-Ваальса, водородных связей и электростатических сил.

Классическое уравнение адсорбции – это уравнение Гиббса, которое показывает соотношение между адсорбцией и изменением поверхностного натяжения с концентрацией разбавленного раствора:

$$\Gamma = - \frac{\partial \sigma}{\partial C} \frac{C}{RT},$$

где  $\Gamma$  – адсорбция, моль/см<sup>2</sup>;

$C$  – равновесная концентрация, моль/л;

$R$  – универсальная газовая постоянная, 8.31 Дж/моль·К;

$T$  – абсолютная температура, К.

*Хемосорбция* - разновидность адсорбции, которая протекает под действием сил основных валентностей, т.е. сопровождается химическим взаимодействием. Хемосорбция зависит от природы фаз. При повышении температуры она усиливается. Хемосорбция практически необратима и приводит к образованию прочных поверхностных (буферных) слоев между адсорбентом и адсорбатом.

С термодинамической точки зрения адсорбция проявляется с уменьшением свободной энергии Гиббса ( $E_g$ ). Как и все процессы, сопровождающие уменьшением энергии Гиббса, адсорбция является самопроизвольным процессом. Переход вещества из газовой или жидкой фазы в адсорбированное состояние связан с потерей по меньшей мере одной степени свободы (трехмерная объемная газовая или жидкая фаза двумерная поверхностная фаза), что ведет к уменьшению энтропии системы ( $E_s$ ). Поскольку энтальпия ( $E_n$ ) связана с энергией Гиббса и энтропией уравнением

$$E_n = E_g + TE_s,$$

то в процессе адсорбции она убывает, следовательно, адсорбция – процесс экзотермический.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 6. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

### 10. Поверхностно-активные вещества.

### 11. Основы реологии. Понятие о прочности композиционных строительных материалов.

#### 10. Поверхностно-активные вещества.

Поверхностно-активными веществами (ПАВ) называют такие химические соединения, которые адсорбируются на поверхностях раздела жидкостей и твердых тел и влияют на их физико-химические или химические свойства. ПАВ являются, как правило, соединениями, молекулы которых состоят из двух главных частей – радикала и функциональной группы.

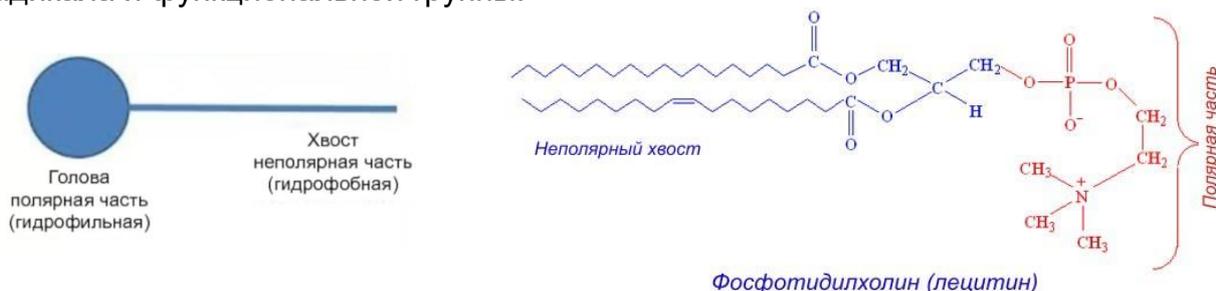


Рисунок 22 – Обозначение молекулы ПАВ

**Радикал** – представляет собой группу атомов, которая при ряде химических превращений неизменна и переходит из молекулы одного соединения в молекулу другого. Радикалы образуются, например, при отщеплении в молекулах углеводородов органических соединений атомов водорода. Так, если в любом предельном (насыщенном) соединении, относящемся к классу парафинов типа  $C_nH_{2n+2}$ , отщепляется атом водорода, то оставшаяся группа атомов  $C_nH_{2n+1}$  является алифатическим (жирным) радикалом.

Место отщепленного водорода в молекуле может занять другой атом или группа атомов, обладающих определенными свойствами, связанных со стационарным смещением электронов на атомных орбитах, что обуславливает наличие определенного электрического диполя и дипольного момента всей молекулы. Такие атомы или группы атомов называются **функциональными группами**.

Наиболее часто встречающиеся в составе ПАВ функциональные группы:

- гидроксильная: (– OH);
- карбоксильная: (– COOH);
- альдегидная: (– COH);
- аминная (аминогруппа): (– NH<sub>2</sub>);
- нитрогруппа: (– NO<sub>2</sub>);
- сульфогруппа: (– SO<sub>3</sub>H).

По количеству функциональных групп в молекуле ПАВ могут быть одно-, двух- и многоосновными.

Соединения, в которых алифатический радикал содержит менее 10 атомов углерода, как правило, не обладают поверхностной активностью, т.е. способностью адсорбироваться и понижать поверхностное натяжение жидкостей или поверхностную энергию твердых тел. При содержании в радикале более 10 атомов углерода они обычно поверхностно-активны и называются **высшими жирными ПАВ**.

Классификация ПАВ по способности образовывать ионы и заряду ионов.

Принципиально все ПАВ разделяют на две большие группы: **ионогенные** соединения, при растворении в воде диссоциирующие на ионы, и **неионогенные**, которые на ионы не диссоциируют.

В зависимости от того, какими ионами обусловлена поверхностная активность ионогенных веществ – анионами или катионами, ионогенные вещества подразделяются на *анионоактивные*, *катионоактивные*, *амфотерные*. Анионоактивные ПАВ активны в щелочных растворах, катионоактивные – в кислых, амфотерные – в тех и других.

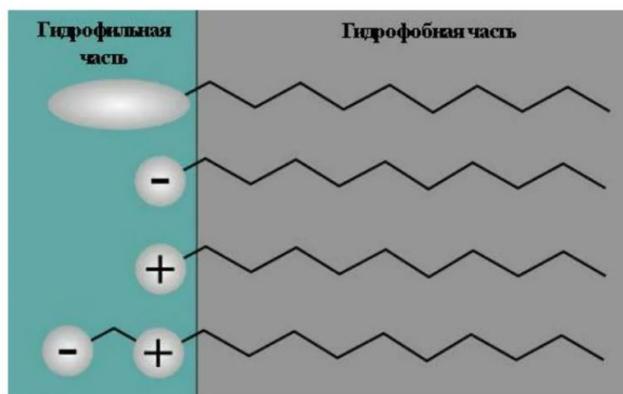


Рисунок 23 – Схемы ПАВ по способности образовывать ионы

Анионоактивные вещества в щелочных растворах, образуя отрицательно заряженные поверхностно-активные ионы (анионы):



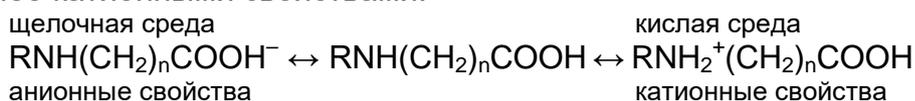
Катионоактивные вещества при диссоциации в кислых растворах образуют положительно заряженные поверхностно-активные ионы (катионы):



К анионоактивным ПАВ относятся: карбоновые кислоты ( $\text{RCOOH}$ ) и их соли ( $\text{RCOOMe}$ ) и др.

К катионоактивным ПАВ относятся амины, аммониевые основания:  $\text{RNH}_2$ ;  $\text{RNH}_3\text{Cl}$ .

Амфотерные ПАВ содержат две функциональные группы, одна из которых имеет кислый, другая – основной характер, например карбоксильную и аминную группу. В зависимости от среды амфотерные соединения обладают анионными, либо катионными свойствами:



Неионогенные ПАВ, растворяясь в воде, не образуют ионов.

К группе неионогенных ПАВ относятся продукты оксиэтилирования жирных кислот, спиртов, аминов и др.

#### Классификация ПАВ по механизму действия

В зависимости от действия ПАВ в дисперсных системах они делятся на 4 группы:

К *первой группе* относятся низкомолекулярные, истинно растворимые в воде ПАВ, например спирты. Они являются слабыми смачивателями и пеногасителями.

К *второй группе* относятся ПАВ диспергаторы и эмульгаторы. Адсорбируясь, эффективно понижают свободную поверхностную энергию жидкости или твердого тела и тем самым облегчают процесс образования новых поверхностей и диспергирование. Эти вещества обладают и некоторыми стабилизирующими действиями. В результате ориентированной [адсорбции](#) ПАВ второй группы гидрофобизируют твердые поверхности и, наоборот, гидрофилизируют гидрофобные поверхности.

В *третью группу* объединены ПАВ, являющиеся хорошими стабилизаторами. Поверхностная активность их сравнительно мала. Эти ПАВ являются также хорошими адсорбционными пластификаторами – пластифицируют структуру,

понижая их прочность и структурную вязкость. В цементных растворах и бетонах это позволяет переходить к жестким и вместе с тем однородным смесям, способствуют равномерности перемешивания, повышает плотность и долговечность (морозостойкость), приводит к повышению прочности и к снижению расхода цемента. В технологии получения битумоминеральных материалов эти ПАВ повышают сцепление битума с минеральными заполнителями, обеспечивают равномерное перемешивание асфальтобетонной смеси; укрепляют, стабилизируют грунты, используемые в качестве конструктивного слоя дорожных одежд.

**Четвертая группа ПАВ** – это вещества, обладающие высокой поверхностной активностью, смачивающим и гидрофобизирующим действием. Они также эффективные эмульгаторы и стабилизаторы эмульсий. В эту группу входят мыла жирных кислот и аминов.

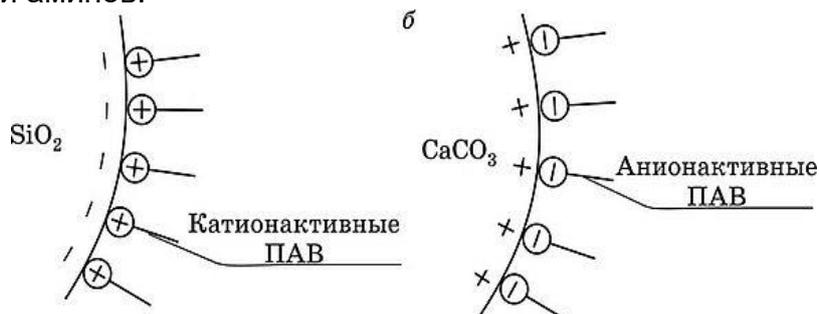


Рисунок 24 – Схема взаимодействия ПАВ с поверхностью различных горных пород: а - кремнеземистая (кислая) порода; б - карбонатная порода

Классификация ПАВ по растворимости в воде и маслах.

Растворимость ПАВ в той или иной среде зависит от молекулярной структуры, которая определяет, какие будут вещества: водорастворимые, водомаслорастворимые, маслорастворимые.

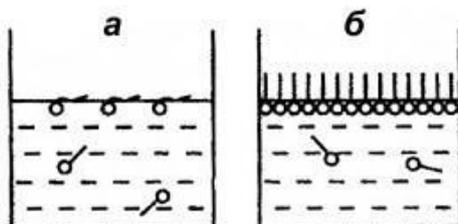


Рисунок 25 – Ориентация молекул ПАВ на поверхности водный раствор-газ а – в разбавленных растворах; б – в концентрированных растворах

Под **мицеллой ПАВ** понимают ассоциат дифильных молекул, лиофильные группы которых обращены к соответствующему растворителю, а лиофобные группы соединяются друг с другом, образуя ядро мицеллы.

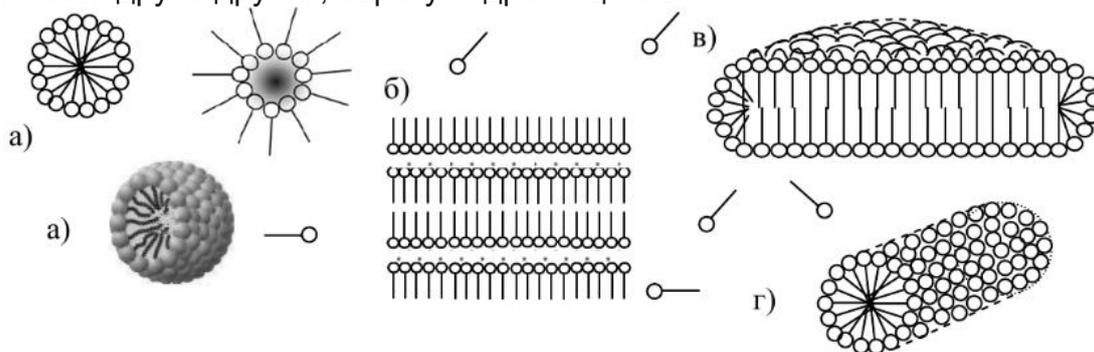


Рисунок 26 – Мицеллы сферические (а), пластинчатые (б), дискообразные (в), цилиндрические (г)



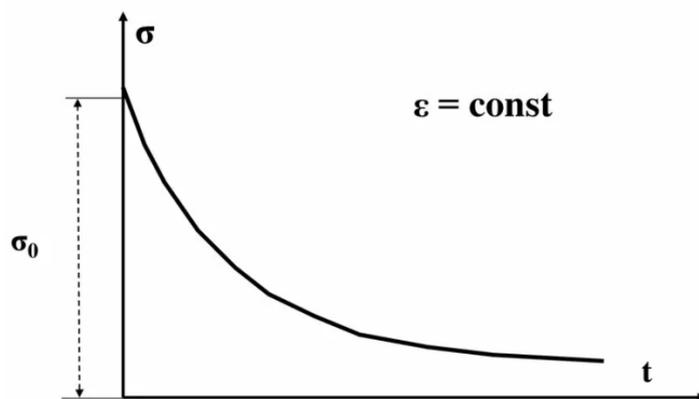


Рисунок 29 – Релаксация напряжений

Реологические процессы деформирования упруговязкопластичных систем неразрывно связаны с их релаксационной природой, а сама релаксация напряжений в значительной мере зависит от температуры. Таким образом, температура – основной фактор движения микрочастиц: флуктуаций атомов в узлах кристаллической решетки твердых тел, перемещений молекул и мицелл относительно друг друга в жидкостях. Перемещение молекул, атомов и сегментов дисперсных частиц возможно только за счет энергии теплового движения, а всякие механические воздействия, которые влияют на систему, лишь облегчают этот процесс и придают ему заданное направление. Важно знать закономерности изменения под влиянием температуры двух основных реологических характеристик – прочности и вязкости (в случае жидкости – [когезии](#) и [адгезии](#)).

Для большинства строительных материалов вязкость является важной технологической характеристикой, знание значения которой позволяет определить оптимальный режим их приготовления. Для битумов это касается режимов их подготовки (нагрев, перекачка по трубопроводам на АБЗ и перемешивание), для пластмасс – перемешивание и формование, для красок – способность растекаться и закрепляться на твердой окрашиваемой поверхности, для цементобетонных смесей и растворов – способность равномерно распределяться в форме (опалубке) и склонность к тиксотропии при применении вибрационных уплотняющих механизмов. Важно также знать закономерности изменения вязкости для термопластичных материалов (например, асфальтобетонов), т.е. материалов, которые способны при изменении температуры неоднократно переходить из твердого состояния в вязкопластичное (жидкое), и наоборот.

*Композиционный материал* (композит, КМ) — искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними.

Прочность композита складывается из:

- прочности армирующего элемента (*наполнителя, упрочнителя*),
- прочности матрицы,
- прочности контактного слоя – самая важная с точки зрения создания композитов.

Максимальная прочность достигается, если между матрицей и армирующим элементом (наполнителем, заполнителем) происходит образование твердых растворов или химических соединений.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 7. Теоретические основы бетоноведения.**

### 1. Физико-химические основы материаловедения и технологии материалов на неорганических вяжущих.

#### 2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения.

##### *1. Физико-химические основы материаловедения и технологии материалов на неорганических вяжущих.*

В теории бетона в настоящее время выделяют два направления:

- структурообразование цементобетона и стабильность структурных связей в материале при эксплуатационных воздействиях на инженерные сооружения;
- технологическая надежность приготовления смесей (включая расчет состава), их уплотнения (формования), что обеспечивает заданные технические требования.

Оба направления тесно связаны друг с другом и не имеют четкой границы между собой. Тем не менее, физико-химическая теория структурообразования бетона является доминирующей и предшествует разработке его технологии.

Практическое значение теории бетона заключается в научном обосновании технологии получения этого материала и его надежной работы в инженерной конструкции. Большой вклад в развитие фундаментальных общетеоретических основ технологии бетона в разное время внесли В.В. Михайлов, Б.Г. Скрамтаев, П.А. Ребиндер, А.Е. Десов, Ю.М. Баженов, Н.А. Мощанский, И.Н. Ахвердов, С.В. Шестоперов, С.М. Ицкович, А.Е. Шейкин, К.М. Грушко, Л.А. Феднер, В.Б. Ратинов и др.

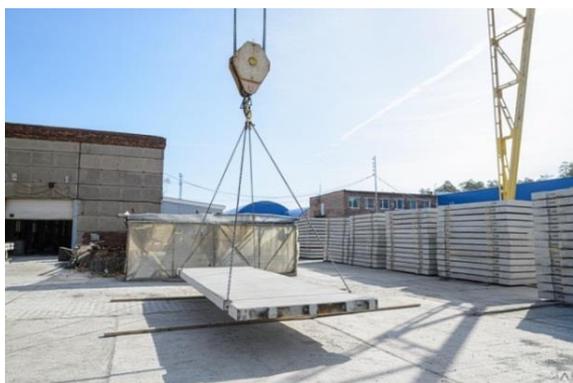


Рисунок 30 – Дорожные цементные бетоны

При создании композиционного монолита необходим энергетический процесс для объединения этих компонентов в единое целое, т.е. процесс образования прочных структурных связей между ними. Изменяя структуру бетонов, можно изменить характеристики материала. Под понятием структуры понимают совокупность данных о строении материала, взаимное расположение структурных элементов, их количественное соотношение и взаимосвязь. Иначе под структурой понимают расположение в пространстве отдельных элементов и характеристику сил, соединяющие эти элементы.

#### *2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения.*

Основными структурообразующими компонентами бетона являются цемент и вода, а также мелкий и крупный заполнители из природных и искусственных материалов.

Цемент состоит из минералов клинкера:  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (алит),  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (белит),  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (трехкальциевый алюминат),  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (четырекальциевый алюмоферрит); оксидов  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , и других веществ в незначительном количестве.

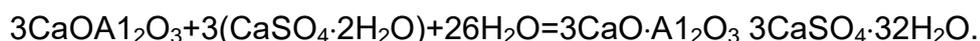
Особенности микроструктуры основных компонентов цемента заключаются в следующем. Во всех перечисленных соединениях присутствует CaO. Атом кальция легко теряет два электрона своей внешней оболочки и превращается в  $\text{Ca}^{2+}$ -ион. В таком виде он вступает в химические реакции с другими веществами, образуя новые соединения.

В химических соединениях цемента присутствует также диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . При контакте кремния и кислорода к двум атомам кислорода переходят все четыре электрона атома кремния. В результате образуются прочные ионные связи  $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$ . Для инициирования связи атома кремния с атомом кислорода необходимо, чтобы их электроны пришли в энергетически возбужденное состояние, что достигается при высоких температурах.  $\text{SiO}_2$  входит во все сложные химические соединения в виде комплексного аниона в форме цепочек и пространственной сетки.

Оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  относится к типу кристалла гексагональной системы, кристаллическая решетка которой обладает отрицательным зарядом, что позволяет ей участвовать в более сложных соединениях в качестве аниона. Из атомов алюминия может создаваться кристаллическая решетка в особых случаях, когда образуются устойчивые молекулы  $\text{Al}_2$ , имеющие некоторую аналогию с молекулой  $\text{H}_2$ . Для соединения с кислородом молекула  $\text{Al}_2$  должна быть предварительно разрушена и переведена в ионную валентную форму. При этом атомы алюминия возбуждаются и в таком состоянии могут присоединиться к трем атомам кислорода ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Высокая температура является эффективным средством возбуждения, при котором молекула  $\text{Al}_2$  переходит в валентное состояние. Этот процесс осуществляется при получении цементного клинкера во время обжига исходной смеси.

Соединение, входящее в один из клинкерных минералов цемента –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , представляет собой кристалл гексагональной системы – гематит; это соединение обладает свободной валентностью.

Все образующиеся в цементном клинкере химические соединения обладают ионной кристаллической структурой, легко гидратируются и образуют раствор. При размалывании клинкера к нему для регулирования начала схватывания цементного геля добавляют 1...4 % гипса. При взаимодействии воды с портландцементом в присутствии гипса из перенасыщенной жидкой фазы интенсивно кристаллизуется труднорастворимый гидросульфат алюмината кальция (эттрингит):



Эттрингит кристаллизуется на поверхности цементных зерен и формирует на ней полупроницаемую гелевую оболочку, обладающую большой экранирующей способностью. Вследствие этого в начальный момент взаимодействия цемента с водой скорость гидратации цемента значительно снижается.

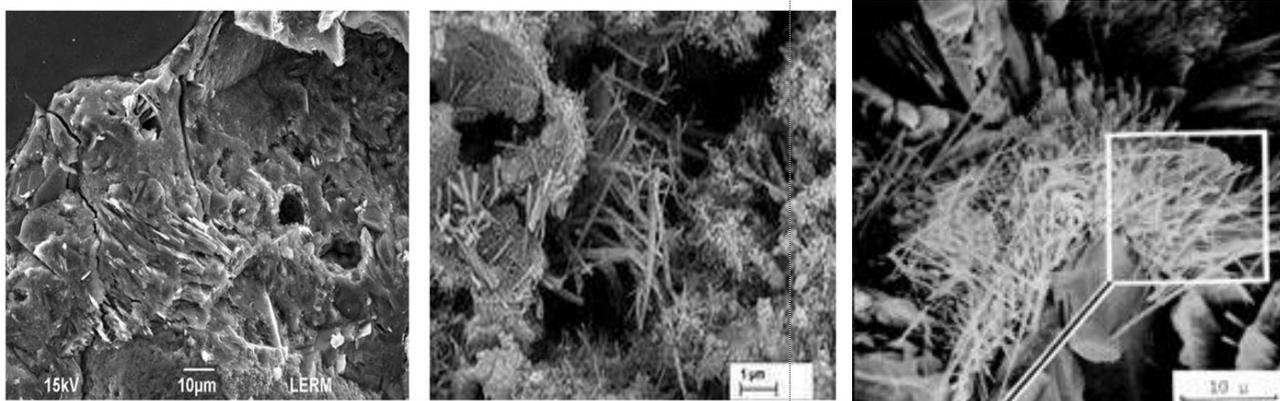


Рисунок 31 – Микроструктура цементного камня

Непосредственный контакт поверхности гелевой оболочки с еще не гидратированной поверхностью зерна цемента отсутствует, т.е. в процессе формирования экранирующих оболочек образуется зона перехода. Размеры этой зоны определяются радиусом действия ван-дер-ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия на ее границе. Благодаря им возникающие новообразования коллоидных размеров удерживаются вблизи поверхности цементных зерен.

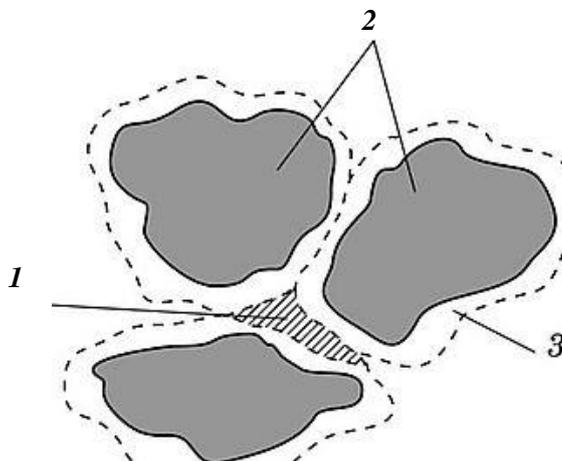


Рисунок 32 – Схема образования микроструктуры цементного камня  
1 - капиллярное пространство; 2 - зерна портландцемента; 3 - зона перехода

Таким образом, цемент – это сложное химическое вещество, состоящее из различных соединений и способное совместно с водой давать новообразования, скрепляющие минеральные заполнители в единый прочный монолит.

Вода – активный химический компонент, участвующий в процессах структурообразования цементного геля. Несмотря на сравнительно простую формулу ( $H_2O$ ), структура воды изучена пока недостаточно, а свойства ее (в частности pH) сильно изменяются при воздействии различных электромагнитных полей. Вода – неоднородная жидкость. Ее молекулы могут существовать в трех формах: одиночные молекулы (гидроль) –  $H_2O$ , двойные молекулы (дигидроль) –  $(H_2O)_2$ , тройные молекулы (тригидроль) –  $(H_2O)_3$ . В жидком состоянии вода представляет собой смесь всех трех форм молекул, соотношение между которыми зависит от температуры и других факторов. Молекулы воды характеризуются большой устойчивостью. Однако сама молекула воды во многом подобна ионам: ее можно рассматривать как ион кислорода  $O^{2-}$  с присоединенными к нему двумя ионами водорода  $H^+$ . Такое соединение ионов придает молекуле воды свойство ориентирования в электрическом поле: своим положительно заряженным концом молекула направлена к отрицательному полюсу, а отрицательно заряженным – к положительному. Такое строение и ориентировка молекул определяет большой дипольный момент воды, что, в свою очередь, придает молекуле воды способность к поляризации, характеризующейся диэлектрической проницаемостью. Этим в некоторой мере объясняется аномальная способность воды растворять различные вещества, молекулы которых соединены главным образом ионной связью.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 8. Теоретические основы бетоноведения.

2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения (продолжение).

3. Явление адсорбции.

2. Основы структурообразования, связи, механизм твердения (продолжение).

Молекулы воды связаны между собой водородной связью, что обуславливает огромную силу их сцепления, проявляющуюся в поверхностном натяжении воды и ее значительной адгезионной способности по отношению к другим веществам. Такие особенности воды инициируют размягчение материалов, контактирующих с ней.

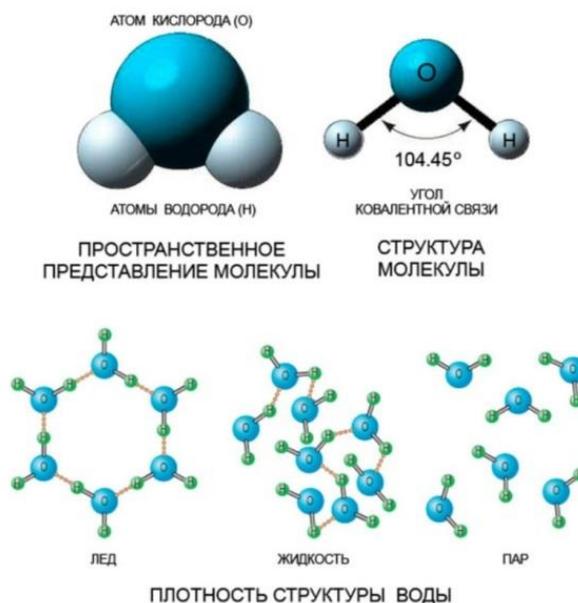


Рисунок 33 – Структура воды

При взаимодействии с твердым телом структура и свойства воды претерпевают качественные изменения; они тем значительнее, чем тоньше пленки воды на поверхности или между поверхностями твердых тел и интенсивнее силы поляризации. У сплошных массивных тел, линейные размеры которых составляют десятки и сотни сантиметров, поверхность единицы объема невелика и явления, происходящие на поверхности раздела фаз, не имеют существенного значения. Напротив, в дисперсных и особенно в коллоидных системах удельная поверхность очень велика и с уменьшением крупности частиц быстро возрастает. При взаимодействии молекул с твердым телом, обладающим гидрофильными свойствами, его поверхность покрывается тонким слоем воды, которая удерживается адсорбционными силами. Источником этих сил является нескомпенсированность ионных или молекулярных сил на поверхности раздела двух фаз или в межфазном поверхностном слое (например, в капиллярах).

Полярные молекулы воды, находясь в электрическом поле поверхности цементных частиц, ориентируются определенным образом и образуют гидратные оболочки. Предельная водоудерживающая способность цементного геля во многом определяется физико-химическими свойствами цемента и может изменяться в широких пределах в зависимости от его минералогического состава, дисперсности, количества воды и введенных добавок, а также способа и интенсивности (удельной мощности) механического воздействия на цементный гель. Поэтому огромное значение имеет внедрение новых видов активации компонентов композиционных

материалов: электромагнитная обработка воды затворения, трибоактивация цемента и песка перед их взаимодействием с водой и др.

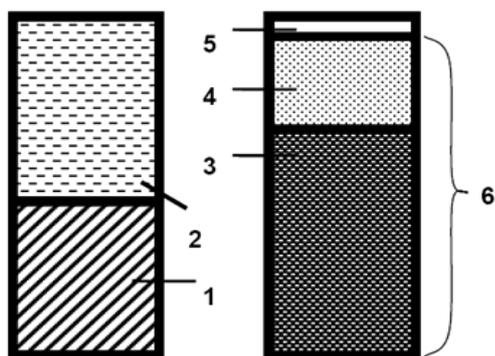


Рисунок 34 – Изменение объема твердой и жидкой фазы в системе «цемент-вода» при гидратации цемента

- 1 - объем негидратированного цемента
- 2 - первоначальный объем воды
- 3 - объем твердой фазы гидратированного цемента
- 4 - объем гелевой воды
- 5 - объем контракционных пор
- 6 - объем цементного геля вместе с порами

### 3. Явление адсорбции.

Основой адсорбционных процессов является господствующий во всех явлениях природы всеобщий закон, выражающийся в тенденции систем самопроизвольно уменьшать запас свободной энергии. Стремясь снизить свою поверхностную энергию и нейтрализовать электрический заряд, дисперсная частица притягивает к себе молекулы воды, имеющие дипольную структуру.

На поверхности частиц твердой фазы адсорбируются не только молекулы воды. Большинство частиц, состоящих из ионных кристаллов, имеют отрицательный заряд, и поэтому около их поверхности скапливаются катионы, находящиеся в воде. Эти катионы образуют вокруг частиц два слоя: адсорбционный и диффузный. Адсорбционный слой располагается около поверхности частиц, а за ним следует диффузный слой ионов. Явление связывания воды рассматривают как разновидность феномена гидратации частиц, протекающей в две стадии. Вначале под влиянием поверхностных сил разрываются первичные водородные связи между молекулами воды, а затем они вступают в водородную связь с кислородными и гидроксильными группами на поверхности частиц. Гидратация, создаваемая ионизированными группами (ионная гидратация), протекает полнее, и молекулы воды тем прочнее удерживаются на поверхности минеральных частиц, чем больше соответствие кислородных и гидроксильных групп упорядоченной структуре молекул воды, ориентированных в их электрическом поле. О механизме связывания воды имеются различные точки зрения, однако все они сходятся на том, что основную роль играет силовое поле притяжения вблизи поверхности минеральных частиц. Об этом свидетельствуют исследования, выполненные с помощью ядерного магнитного резонанса и радиочастотной спектроскопии. Показано, что молекулы воды у поверхности частиц, взаимодействуя с ионами кристаллической решетки, притягиваются к ней, уменьшается амплитуда колебаний молекул воды, увеличиваются ее плотность, вязкость и сопротивление деформациям.

Молекулы воды образуют не только пленки вокруг частиц, но и проникают внутрь их кристаллических решеток, если они относятся к раздвижному типу. В этом случае связанная вода будет образовываться также внутри самих кристаллических

решеток в межпакетном пространстве. Адсорбционный слой воды может быть как мономолекулярным, так и полимолекулярным. Толщина пленки воды, состоящей из адсорбционного и диффузного слоев (сольватная оболочка), зависит от минералогического состава (химического потенциала), размера и формы частиц, химического состава адсорбированных ионов и от внешних условий (атмосферного давления и температуры).

Частицы твердой фазы, имеющие различный минералогический состав, обладают различной степенью гидрофильности, т.е. активностью по отношению к воде, а поэтому они с неодинаковой силой взаимодействуют с диполями воды. При одинаковом минералогическом составе на частицах большего размера образуются более толстые пленки воды, чем на частицах меньшего размера. Это явление объясняется тем, что в непосредственной близости от поверхности частиц твердой фазы силовое поле мало зависит от их размера, и поэтому степень притяжения первого адсорбционного слоя воды примерно одинакова у частиц различной крупности. По мере же удаления от поверхности напряжение силового поля изменяется неодинаково – на одном и том же расстоянии от поверхности напряжение будет меньшим у мелких частиц с большей кривизной поверхности, чем у более крупных. Специфические свойства адсорбированной воды с различной молекулярной структурой существенно влияют на процессы формирования физико-механических свойств цементного геля и его превращение в твердое тело. Образование аномальных граничных слоев воды в зависимости от структуры поверхности минеральной частицы, на которой происходит ее зарождение, обуславливается также наличием на границе раздела твердой и жидкой фаз двойного электрического слоя.

В процессе адсорбции поверхностью цементной частицы ионов из водного раствора на ней возникают свободные химические связи, стимулирующие в свою очередь образование электрического заряда. Происходит это следующим образом. В сухом состоянии кристаллические решетки минералов цементной частицы находятся в электростатическом равновесии: их суммарный потенциал равен нулю. В водном растворе, когда начинается ионный обмен на границе раздела фаз в системе «твердое тело - жидкость», на поверхностях минералов, составляющих частицу цемента, возникают нескомпенсированные электрические заряды (свободные химические связи), которые и являются основной причиной гидратации цемента. Этот процесс схематически изображен на рис. 35.



Рисунок 35 - Схема распределения зарядов на границе раздела фаз в системе «цементная частица - водный раствор»:

- 1 - слой зарядов, плотно прилегающих к поверхности цементной частицы (I слой);
- 2 - слой зарядов противоположного знака (II слой);
- 3 - диффузионный подвижный слой зарядов (III слой)

Представляет интерес рассмотрение микромеханизма взаимодействия воды с поверхностью твердых частиц цемента. Этот процесс происходит следующим образом. Полярные молекулы воды, вступая в контакт с электрическим полем поверхности цементной частицы, группируются вокруг ионов диффузного слоя и формируют гидратные (сольватные) оболочки (рис. 36).

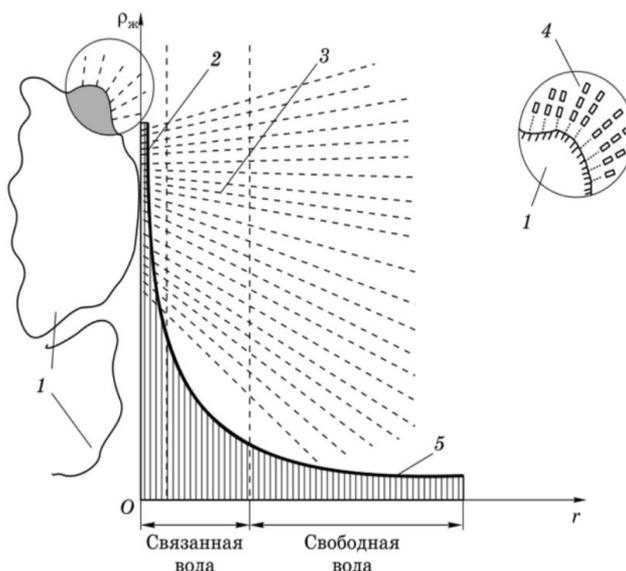


Рисунок 36 - Схема изменения плотности жидкости ( $\rho_{ж}$ ) при гидратации цементной частицы в зависимости от толщины адсорбированного слоя ( $r$ ):

- 1 - цементные частицы; 2 - прочносвязанная (адсорбционная) вода; 3 - рыхлосвязанная (диффузная) жидкость; 4 - диполи воды; 5 - зависимость  $\rho_{ж}$  от  $r$

При введении в цементный раствор пластифицирующих добавок и ускорителей твердения плотность сольватного слоя жидкости вокруг частиц уменьшается. Это происходит, потому что указанные добавки экранируют поверхностные электростатические силы цементных частиц, что, в свою очередь, снижает притяжение молекул воды и их ориентацию в сольватных оболочках.

В ряде работ установлено, что при обработке цементной дисперсии в акустическом поле со звуковым или ультразвуковым диапазоном частот протекает более интенсивная контракция объема цементного геля в связи с пептизацией ассоциатов комплексов твердой фазы и качественным перераспределением воды (т.е. активным поглощением ее «сухими» поверхностями цементных частиц) с одновременным вытеснением воздушной фазы.

Убедительная аргументация существования этого процесса на теоретическом уровне приведена И.Н. Ахвердовым в его монографии «Физика бетона». Получено экспериментальное подтверждение, что в результате интенсивной пептизации и качественного перераспределения жидкой фазы в цементном геле существенно увеличивается адсорбционная способность цемента и плотность водной пленки на поверхности его частиц. В итоге высвобождается дополнительная поверхностная энергия, которая стремится снизить свой избыточный потенциал и вызывает при этом усилия, сближающие частицы твердой фазы, что и определяет интенсивную контракцию цементного геля.

В связи с изложенным и с учетом положений и эффектов ЭИТ (Я.Н. Ковалев) представляется возможным создание бетонных и железобетонных изделий с ускоренным режимом их твердения и подготовки для эксплуатационного применения.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 9. Теоретические основы бетоноведения.

### 4. Основные положения теории двойного электрического слоя.

### 5. Коррозия и защита бетона.

#### 4. Основные положения теории двойного электрического слоя.

Современная теория строения ДЭС мицелл основана на представлениях Штерна. Согласно этой теории ДЭС состоит из двух слоев: внутреннего (адсорбционный) и внешнего (диффузный). Толщина первого не более двух диаметров ионов, а второго – во много раз больше, так как он имеет размытое строение из-за теплового движения ионов.

Адсорбционный слой располагается на твердой поверхности и состоит из двух рядов ионов противоположных знаков. Непосредственно на поверхности твердой фазы сорбируются потенциалопределяющие ионы на расстоянии, равном их радиусу в несольватированном состоянии, и поверхность приобретает электрический заряд. В результате электростатического притяжения из раствора поступает часть противоионов, которые образуют второй слой ионов, противоположного знака. Но эта часть противоионов располагается в жидкой фазе и движется вместе с твердой частицей. Остальная часть противоионов располагается также в жидкой фазе, но представляет собой размытую (диффузную) ионную оболочку. Причем, концентрация противоионов, наибольшая около заряженной поверхности твердой фазы, убывает по мере увеличения расстояния от границы раздела. При движении частицы в электрическом поле противоионы диффузного слоя не перемещаются вместе с ней.

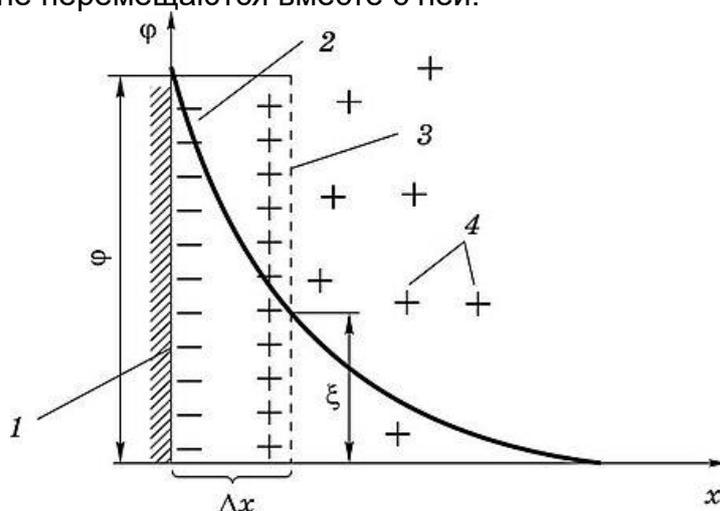


Рисунок 37 - Двойной электрический слой и падение в нем потенциала  $\phi$ :

$x$  - расстояние от поверхности твердого тела;

$\phi$  - полный скачок потенциала у поверхности;

$\xi$  - потенциал на расстоянии  $\Delta x$  от межфазной границы, равном двойному радиусу адсорбированных ионов;

1 - поверхность твердого тела;

2 - адсорбционный слой ионов, прочно связанный с поверхностью;

3 - слой противоионов;

4 - диффузный слой свободных ионов

Разность потенциалов в адсорбционном слое между потенциалопределяющими ионами и всеми противоионами называется электротермодинамическим потенциалом. Его величина зависит только от количества адсорбированных потенциалопределяющих ионов. Это число может изменяться в зависимости от условий проведения опыта и методов очистки

полученного золя. Неподвижный адсорбционный слой содержит только часть противоионов. Они понижают заряд твердой поверхности, обусловленный потенциалопределяющими ионами. Этот, частично нейтрализованный заряд, и противоионы диффузного слоя создают разность потенциалов между неподвижной и подвижной частями двойного электрического слоя, т.е. между гранулой и диффузным слоем. Эта разность потенциалов называется электрокинетическим потенциалом. Ее обозначают греческой буквой  $\zeta$  (дзета) и потому часто называют  $\zeta$ -потенциал. Под действием электрического поля мицелла (макромолекула) как бы разрывается на границе между адсорбционным и диффузным слоями (эта граница называется поверхностью скольжения), и частица (гранула) получает заряд, соответствующий  $\zeta$ -потенциалу. Установлено, что с увеличением толщины диффузного слоя возрастает заряд гранулы и, следовательно, увеличивается  $\zeta$ -потенциал.

ДЭС образуется в тонких капиллярах, на поверхности коллоидных и высокодисперсных частиц.

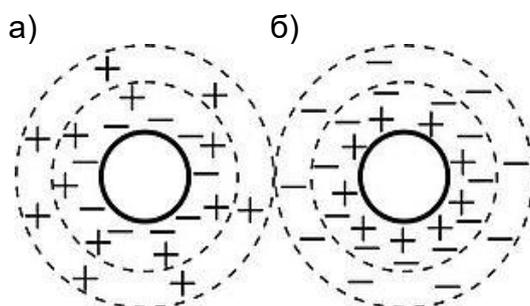
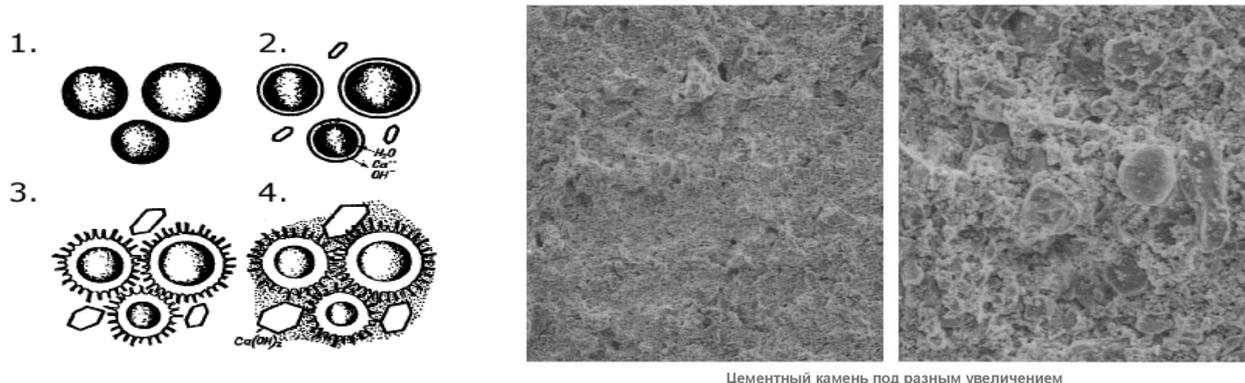


Рисунок 38 - Строение мицеллы:  
а - с отрицательно заряженной частицей;  
б - с положительно заряженной частицей

По мере увеличения объема воды затворения сверх того количества, при котором образуются сольватные оболочки, часть ее располагается между сольватированными частицами и механически удерживается в «порах» цементного геля. По своим свойствам эта вода, как и поверхностные слои диффузной воды, может быть отнесена к рыхлосвязанной (диффузной). Содержание поровой жидкости в цементном геле может изменяться в зависимости от внешнего давления, приложенного при его уплотнении (обработке). При механических воздействиях, например при центрифугировании, вакуумировании и др., происходит отслоение (отжатие) поровой жидкости из цементного геля и тем значительно, чем больше величина внешнего давления. Формирование коагуляционной структуры цементного геля сопровождается сжатием (контракцией) его объема. Механизм контракции цементного геля обусловлен следующими физико-химическими процессами: достижением полного смачивания частиц и вытеснением с их поверхности адсорбированного воздуха; сорбцией воды поверхностью и наружными порами смачиваемых частиц, сопровождающейся более плотной упаковкой ориентированных молекул пленочной воды; образованием ионной среды вокруг частиц цемента (в результате поверхностного растворения составляющих минералов), ведущим к увеличению количества связанной воды; изменением плотности частиц цемента и «воды» при образовании кристаллогидратов.



Цементный камень под разным увеличением

Рисунок 39 – Схема процесса гидратации цемента

1. цементные зерна в воде начальный период гидратации,
2. образование гелевой оболочки на цементных зернах скрытый период гидратации,
3. вторичный рост гелевой оболочки после осмотического разрушения первоначальной оболочки, образование волнистых и столбчатых структур на поверхности зерен и в порах цементного камня - третий период гидратации,
4. уплотнение структуры цементного камня при последующей гидратации цемента.

Бетон — типичный пример композиционного материала, отличающийся сложностью структуры, количеством и характером компонентов, особенностями межфазовой поверхности, имеющей большое значение при воздействии внешней среды. При рассмотрении бетона как полиструктурного материала в зависимости от характера и механизма процессов структурообразования выделяют:

- микроструктуру – структуру цементного камня;
- мезоструктуру – структуру раствора в бетоне, рассматриваемого как двухкомпонентную систему «мелкий заполнитель — цементный камень»;
- макроструктуру – структуру двухкомпонентной системы «крупный заполнитель – раствор».

Микроструктура цементного камня в первом приближении характеризуется такими составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. Мезоструктура цементно-песчаного раствора рассматривается как конгломератная структура, с матрицей в виде цементного камня, а макроструктура – как структура, в которой матрицей служит цементно-песчаный раствор. Крупный заполнитель обуславливает макроструктуру бетона, причем особое значение имеет прочность и характер поверхности его зерен, их крупность, форма и гранулометрический состав. В известной степени свойства крупного заполнителя оказывают влияние на формирование мезо- и микроструктуры бетона, что связано с влиянием щебня на водопотребность бетонной смеси. В свою очередь, мелкий заполнитель, определяя мезоструктуру бетона, влияет на формирование микроструктуры бетона, вследствие того что песок, взаимодействуя с цементным тестом, в значительной мере обуславливает значение В/Ц бетонной смеси. Кроме того, он способствует формированию макроструктуры цементного камня, так как оптимальная толщина растворной пленки на поверхности зерен щебня определяется средней крупностью песка.

Микроструктура цементного камня значительно больше влияет на свойства бетона, чем мезо- или макроструктура. Приведенное деление структуры бетонов

оправдывается тем, что механизм формирования и свойства макро-, мезо- и микроструктур принципиально отличны друг от друга.

Для описания микроструктуры цементного камня и взаимодействия с водой разработан целый ряд моделей, отличающиеся друг от друга разными взглядами на физическое состояние межслоевой воды, в соответствии с которыми первоначальные промежутки между частицами цемента заполняются цементным гелем, представленным преимущественно слабо закристаллизованными гидросиликатами кальция. Формируемая структура бетона в значительной степени обуславливается микроструктурой цементного камня, поэтому, изменяя ее характер и учитывая особенности, можно управлять свойствами бетона в достаточно широких пределах.

Наличие заполнителя существенным образом влияет и на условия твердения цементного камня. В бетоне взаимодействия цемента с водой и его твердение происходят в тонких прослойках между зернами заполнителя при постоянном взаимодействии с ним. Заполнитель повышает водоудерживающую способность цементного теста, ограничивает усадочные деформации, способствует образованию кристаллического каркаса цементного камня, влияет на изменение температуры и влажности в твердеющем цементном камне. Т.о. заполнитель оказывает существенное влияние на формирование структуры цементного камня и бетона.

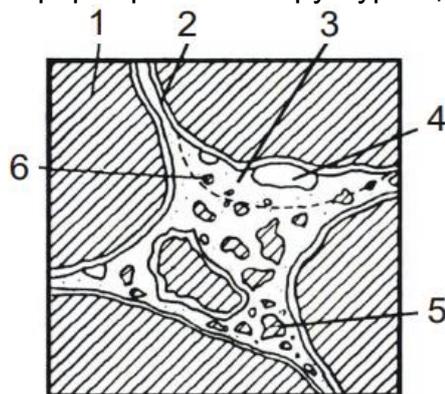


Рисунок 40 – Элементарная ячейка структуры бетона

- 1 – зерно заполнителя; 2 – контактная зона;
- 3 – зона ослабленной структуры вследствие седиментации;
- 4 – воздушные пузырьки; 5 – зона уплотнённой структуры;
- 6 – зона возможного внутреннего водоотделения

Структура бетонной смеси сохраняется и при затвердевании, поэтому структуру бетона следует классифицировать по содержанию цементного камня и его размещению в бетоне (плотная, ячеистая, зернистая). Наибольшей прочностью обладают материалы с плотной структурой, а наименьшей – с зернистой.

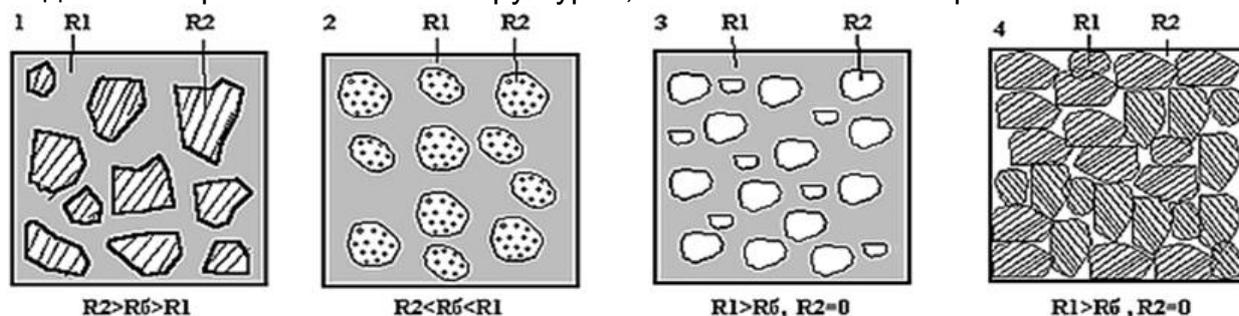


Рисунок 41 – Основные типы макроструктуры бетона

- 1-плотная; 2-плотная с пористым заполнителем; 3-ячеистая; 4-зернистая;
- $R_6$ -средняя прочность структуры;  $R_1$  и  $R_2$  –прочности компонентов бетона

### 5. Коррозия и защита бетона.

При эксплуатации зданий и сооружений важно оценить характер и опасность повреждений. Причины, вызывающие повреждения, а затем и разрушения зданий: воздействия внешних природных и искусственных факторов; воздействия внутренних факторов, обусловленных технологическим процессом; проявление дефектов, допущенных при изысканиях, проектировании, возведении здания; недостатки и нарушения правил эксплуатации зданий, сооружений и оборудования.

Агрессивные среды, воздействующие на бетонные и железобетонные конструкции, классифицируются по ряду признаков:

- степени агрессивного воздействия на бетон и железобетон: неагрессивные, слабо-, средне-, сильноагрессивные;
- физическому состоянию: газовые, жидкие, твердые;
- химическому составу: органические и неорганические, сульфаты, хлориды, кислоты, магниезольные соли, щелочи, соли, кристаллизующиеся с большим увеличением объема;
- биологически активные, продукты метаболизма бактерий, грибов, гифы грибов, корни растений.

Кроме того, в конкретных условиях эксплуатации на бетон могут оказывать повреждающее воздействие определенные физические процессы: температурные (низкие и повышенные температуры в интервале от минус 70°C до плюс 50°C), замораживание и оттаивание, увлажнение и высушивание.

Чаще всего здания и конструктивные элементы преждевременно выходят из строя от суммарного воздействия вышеперечисленных факторов. Разрушение железобетонных конструкций может быть результатом коррозии как бетона, так и арматуры.

Таблица 4 – Устойчивость компонентов бетонной смеси к коррозии

Материал	Свойства
Песок	Кристаллы кварца исключительно химически стабильны, не деградируют со временем
Щебень	В качестве заполнения обычно используется щебень гранитный, своими химическими и механическими свойствами мало отличающаяся от кварцевого песка, атмосферо- и химически устойчивый.
Арматура	Контакт стали в водой и воздухом (бетон паропроницаем) всегда дает очень предсказуемый результат. Даже под защитным слоем бетона армирование будет постепенно корродировать. Выход арматуры на поверхность вследствие разрушения конструкции многократно ускорит процесс.
Цементный камень	Вяжущее — цемент — после схватывания превращается в сравнительно прочный, но не отличающийся химической инертностью цементный камень. Один из его компонентов — $\text{Ca}(\text{OH})_2$ — легко растворяется водой и вступает в реакции с прочими химикатами. Именно с разрушения цементного камня обычно начинается коррозионный процесс ( <i>I типа, II типа, III типа</i> ).



Рисунок 42 – Коррозия бетона

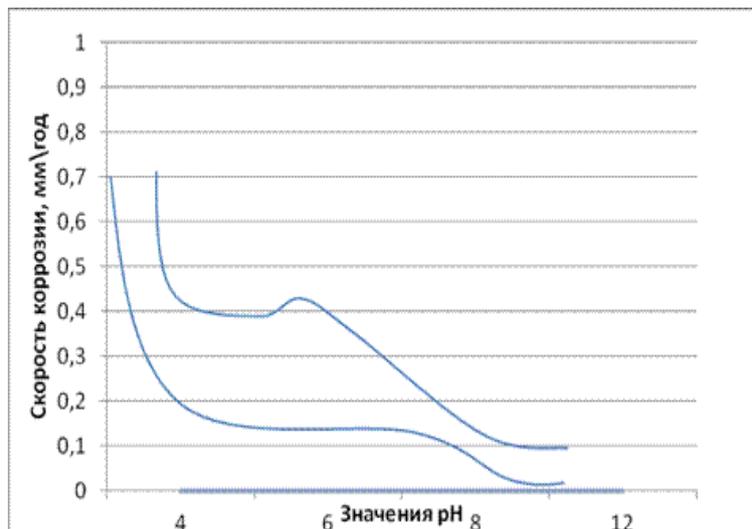


Рисунок 42 – Зависимость скорости коррозии бетона от pH среды

Первичная защита бетона от коррозии предусматривает при его изготовлении и формировании введение в состав специальных добавок (пластифицирующих, модифицирующих, активных минеральных и др.). Кроме того, ориентируясь на условия эксплуатации цементного камня, при его формировании подбирают оптимальный для данных условий минералогический состав либо используют специальные виды цемента, повышают плотность за счет снижения водоцементного отношения, строго соблюдают технологию (уплотнение, уход за бетоном).

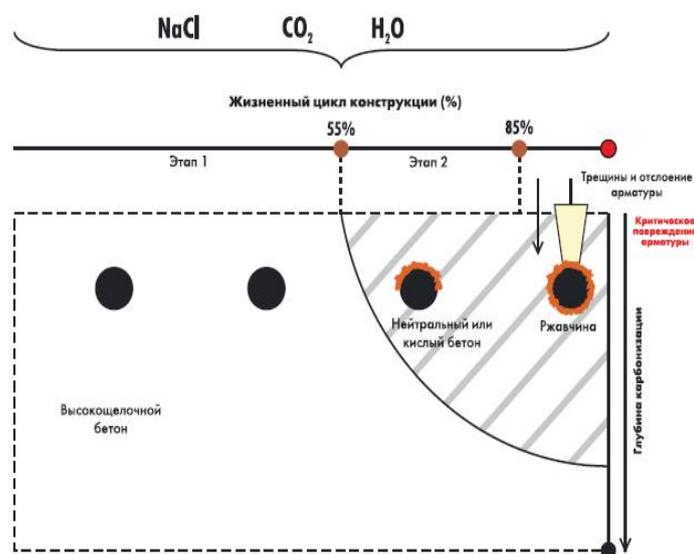


Рисунок 43 – Этапы коррозионного разрушения

Таблица 5 – Мероприятия по защите конструкций от коррозии

Комплекс мер	Разъяснения
Защита арматуры	Повышение коррозионной стойкости армирующего каркаса за счет ингибиторов коррозии и др.
Уплотняющие химические добавки	Как правило, они уменьшают количество пор или делают поры замкнутыми. В результате снижается проницаемость материала для воды и воздуха, реже нестабильный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ заменяется более химически стойкими соединениями.
Заполнение пор	Готовая бетонная конструкция может быть модифицирована проникающими пропитками, нагнетаемыми через пробуренные в ней шурфы или просто нанесенными на поверхность.
Поверхностная защита	Сюда относятся всевозможные меры по гидроизоляции (рулонной и обмазочной). В эту же категорию попадает покраска лакокрасочными материалами.
Биозащита	Антисептические пропитки уничтожают плесень, ее споры и препятствуют их повторному появлению.

Агрессивное действие среды может быть уменьшено путем понижения уровня грунтовых вод или отвода их от сооружений, устройством вентиляции. Повышение коррозионной стойкости поверхностного слоя конструкций достигается обработкой их поверхности торкретированием, гидрофобизацией, силикатизацией, флюатированием, карбонизацией, лакокрасочными материалами и мастиками; введением инъекций растворов в толщу конструкции с целью повышения их плотности и прочности (цементация, смолизация). Образовавшаяся защитная пленка эффективно защищает поверхность бетона не только от воздуха и влаги, но и от воздействия различных микроорганизмов. Защиту бетона от коррозии уплотняющими пропитками используют почти во всех средах (жидкой, газообразной), особенно при повышенной влажности, кроме того, применяют перед нанесением ЛКМ. Биоцидные материалы применяются для защиты бетона от воздействия различных видов грибков, плесени, бактерий, микроорганизмов. Защита бетона от коррозии оклеечными покрытиями применяется при эксплуатации бетонного камня в жидких средах, грунтах с высокой влажностью и местах частого смачивания электролитом.

Наиболее эффективна комплексная защита бетона от коррозии, т.е. как первичная, так и вторичная.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 10. Теоретические основы бетоноведения.**

### **6. Совершенствование технологии цементобетона.**

#### **Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.**

##### **1. Влияние технологии получения на свойства битумных вяжущих.**

##### **7. Совершенствование технологии цементобетона.**

Теоретические основы усиления контактных взаимодействий компонентов бетонных смесей.

Методы активации компонентов цементобетонов.

Под активацией цементно-водных суспензий, растворных и бетонных смесей понимают различные физические, физико-химические и химические способы воздействия, как на отдельные компоненты, так и на их композиции, приводящие к интенсификации процессов структурообразования, модифицированию структуры и свойств композитов. Ряд работ выполнен по активации цементов путем их домола с применением вибромельниц. Мокрое измельчение (активация) цементов более эффективно, чем сухой домол.

Предложен вибрационный способ перемешивания компонентов бетонной смеси, предусматривающий передачу интенсивных вибрационных импульсов через корпус смесителя. Эффект повышения прочности виброперемешанных бетонов медленно затухает во времени, оно более эффективно для жестких смесей с низким В/Ц, которые труднее приготовить в обычных смесителях.

Активация бетонной смеси достигается также при турбулентном перемешивании, основанном на создании высоких градиентов скоростей. Применение турбулентного смешивания позволяет отдельно готовить связующее и бетонную смесь в одной емкости и осуществлять механическую активацию крупного заполнителя и цемента.

Раздельный принцип приготовления бетонной смеси положен в основу интенсивной раздельной технологии (ИРТ). При ИРТ в скоростном смесителе-активаторе предварительно приготавливается цементное тесто с добавкой наполнителя (связующее), которое затем перемешивается в обычном смесителе с заполнителями. В турбулентном смесителе частицы многократно соударяются, в результате повышаются однородность и равномерное распределение компонентов, степень смачивания цемента, имеет место физическое и химическое диспергирование, сдирание экранирующих гидросульфоалюминатных пленок с клинкерных частиц и обнажаются новые активные центры их поверхности.

Интенсификация процесса упрочнения бетона достигается комплексным воздействием акустического поля с частотой 10-16 кГц и повышенной температуры.

Цементное тесто можно предварительно обрабатывать в аэрогидродинамическом активаторе с последующим перемешиванием с заполнителями и разогревом до укладки при 60-65°C. Термоакустическая активация бетонной смеси возможна также при перемешивании в разогретом состоянии в смесителях с акустическими излучателями.

В конце первой стадии структурообразования бетона, когда сформировался пространственный каркас коагуляционной структуры, наблюдается положительный эффект при повторном виброуплотнении.

Эффект повторного вибрирования бетонной смеси согласуется с основами теории направленного структурообразования бетона, разработанными О.П. Мчедловым-Петросяном. В соответствии с этой теорией конечный результат различных физико-механических и физико-химических воздействий зависит от момента их приложения, интенсивности и длительности.

Развиваются исследования по электромагнитным методам активации, направленным на интенсификацию гидратации отдельных клинкерных минералов, регулированию основности гидросиликатов с помощью воздействия переменным или дискретным постоянным электрическим полем определенной частоты.

Интересные результаты получены при активации цементного теста источниками высоких энергий, аэрогидродинамическими излучателями, а также при магнито-механических, электрогидравлических и термоэлектрических воздействиях на растворы и бетоны. Перспективны исследования по активации воды затворения бетонной смеси. Наиболее известным видом активирования такой воды является электромагнитная обработка, хотя механизм ее действия не вполне ясен и носит дискуссионный характер, а достигаемая эффективность нестабильна во времени и колеблется в широких пределах. Действие ультразвукового поля аналогично действию электромагнитного. Эффективно затворение бетонной смеси деаэрированной водой, в том числе омагниченной.

### **Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.**

#### *1. Влияние технологии получения на свойства битумных вяжущих.*

Битумы являются одним из продуктов нефтепереработки. На свойства битумов влияет сам источник нефти и технологический процесс переработки нефти. Большинство нефтеперерабатывающих заводов занимаются переработкой с целью перепродажи нефтепродуктов, особенно нефти, пригодной для извлечения легких и средних фракций. Поэтому необходимы легкие нефти с низкими выходами тяжелых фракций, которые высокоэкономичны и выгодны для переработчиков на нефтяном рынке. С точки зрения нефтепереработки содержание и соотношение асфальтенов и мальтенов, как обязательных компонентов битума, становится менее важным, однако это может существенно повлиять на будущие свойства битумного вяжущего.

Когда более твердый битум получают за счет повышения температуры или условий вакуума внутри дистилляционной колонны, из остатка удаляются более летучие насыщенные и ароматические фракции, таким образом концентрируя асфальтены и смолы. Следовательно, твердый битум будет иметь более высокое содержание асфальтенов, чем более мягкий битум из той же сырой нефти. При производстве более твердых битумов воздушной продувкой концентрация насыщенных углеводородов, относительно инертных к окислению, практически не изменяется.



Рисунок 44 – Транспортирование битума

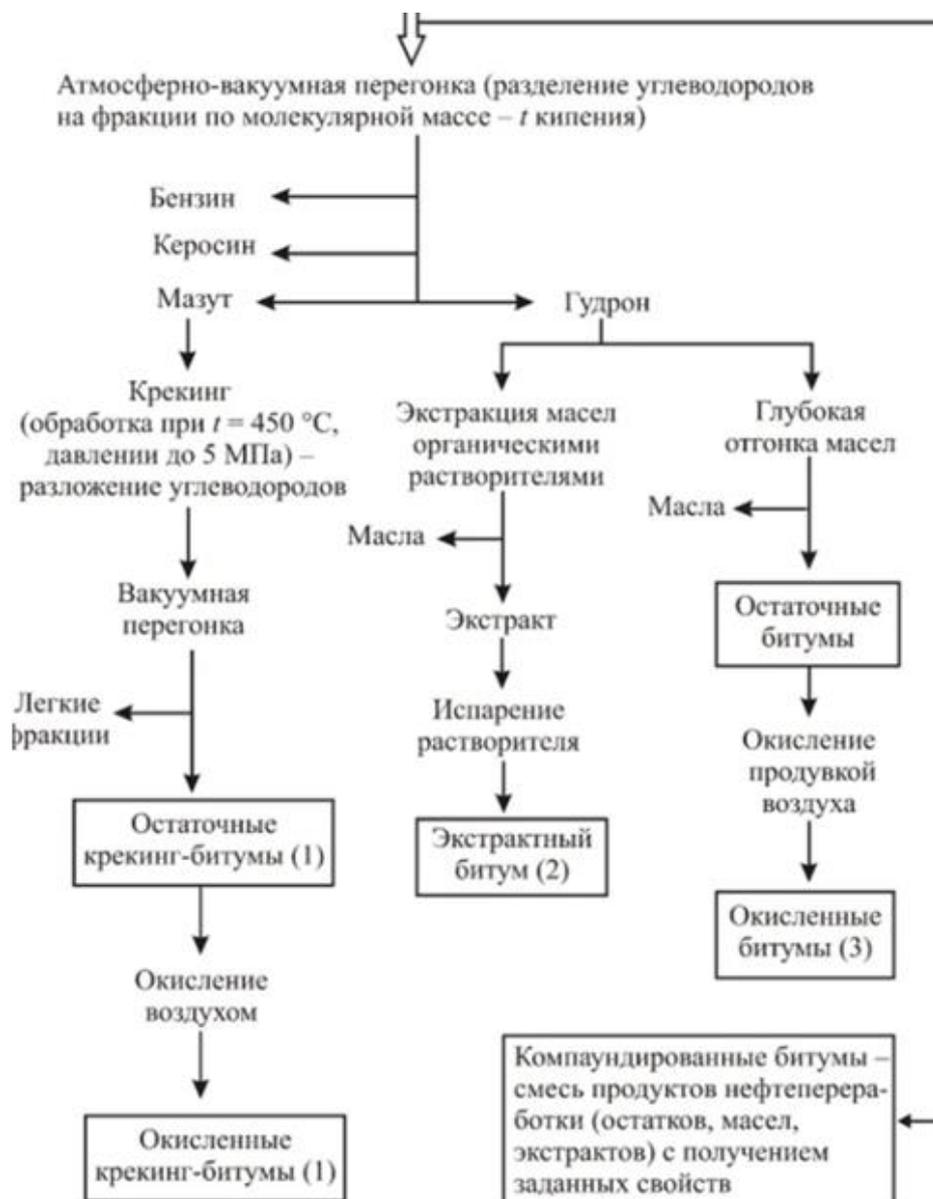


Рисунок 45 – Схема получения нефтяных битумов

Активация битума направлена на улучшение его адгезии с поверхностью каменных материалов. **Адгезия** битума определяется количеством активных групп (гидроксильных, карбоксильных и аминогрупп) в молекулах составляющих битума, взаимодействующих с минеральными компонентами.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 11. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

### 2. Асфальтобетоны.

### 3. Общая характеристика и структура. Распределение битума в асфальтобетоне.

#### 2. Асфальтобетоны.

Выбор материалов для асфальтобетона и технические требования к ним обусловлены их ролью в асфальтобетоне и его назначением в дорожной одежде.

Битумы – основное вяжущее вещество, используемое в дорожном строительстве. Марку битума выбирают в зависимости от вида асфальтобетона, климатических условий района строительства и категории дороги.

Минеральный порошок в асфальтобетоне структурирует битум и образует с ним асфальтовяжущее вещество, которое во многом определяет прочность асфальтобетона, его плотность и теплоустойчивость.

Щебень в асфальтобетоне является активной структурообразующей составляющей, создает каркас, воспринимающий основные нагрузки в покрытии.

Песок повышает удобоукладываемость смеси, более плотно заполняет пространство между зернами крупного заполнителя (щебня, гравия): повышает плотность и прочность материала. В песчаных асфальтобетонах является активной структурообразующей составляющей.

ПАВ. Такие добавки модифицируют вяжущее, улучшают [адгезию](#) битума к поверхности минеральных заполнителей, повышают процесс смачивания битумом частиц заполнителей, в результате чего улучшается удобоукладываемость асфальтобетонных смесей, ускоряются процессы формирования структуры в асфальтобетоне.



Рисунок 46 – Асфальтобетон

### 3. Общая характеристика и структура. Распределение битума в асфальтобетоне.

Физическое взаимодействие битума с минеральными материалами обусловлено способностью вяжущего [адсорбироваться](#) на поверхности минеральных зерен. Образование пленки начинается с объединения битума с частицами минерального материала и заканчивается при укладке, уплотнении и остывании асфальтобетона. На прочность и долговечность асфальтобетона оказывает влияние степень обволакивания минеральных зерен битумной пленкой. При недостатке битума вследствие проникновения воды битумная пленка отслаивается и асфальтобетон разрушается. Формирование пленки битума обуславливается, прежде всего, хорошим смачиванием минерального компонента смеси битумом. Это достигается снижением вязкости битума и нагревом минеральных материалов до рабочей температуры.

Первой стадией физического и химического взаимодействия битума с поверхностью минеральных частиц является смачивание частиц битумом. Именно

смачивание обеспечивает полное обволакивание частиц битумом, в результате чего формируется ориентированный слой битума и происходит физико-химическое взаимодействие его с минеральным материалом. В результате взаимодействия на поверхности минеральных частиц образуются адсорбционно-сольватные слои связанного битума. Известняковые порошки образуют более развитые слои, кварцевые – менее развитые. На поверхности зерен битумная пленка перенасыщена высокомолекулярной частью, причем асфальтенов и смол в граничных слоях больше на известняковом, а не на кварцевом материале.

Как на тонкопористых зернах кварца, так и на зернах известняка наблюдается диффузия жидких углеводородов. Наряду с адсорбционным взаимодействием, схватывающим граничный слой битума, изменяется структура битума вследствие поверхностных сил минерального наполнителя, влияние которых распространяется перпендикулярно поверхности минеральных частиц. Битум попадает в зону их действия и претерпевает структурные изменения. Высокомолекулярные соединения битума образуют цепочки, перпендикулярные к поверхности минеральных зерен. Прочность связи звеньев цепочки по мере удаления от зерна падает и на расстоянии нескольких микрометров ( $10^{-6}$  м) практически равна нулю и битум приобретает объемные свойства. В ориентированном слое битума можно выделить три зоны с характерными структурой и физико-механическими свойствами: твердообразная, структурированная и диффузная.

Твердообразная зона граничит непосредственно с поверхностью частиц минерального наполнителя и представлена в основном адсорбционным слоем. Частицы наполнителя, покрытые твердообразной пленкой, между собой не слипаются, так как пленка клеящей способностью не обладает. Толщина твердообразной зоны на минеральных частицах не превышает долей микрометра. Структурированная зона состоит из упорядоченно расположенных высокомолекулярных компонентов битума, ориентированных в направлении минеральной подложки. За структурированной зоной расположена переходная – диффузная – зона между ориентированным слоем и объемным битумом, в котором он имеет частично упорядоченное строение. Толщина зоны зависит от температуры. При повышении температуры толщина зоны уменьшается до своего минимального значения, а при понижении увеличивается. Между ориентированным слоем и объемным битумом резкого перехода не наблюдается, точно так же и внутри слоя между зонами. В зависимости от размеров и природы зерен минерального наполнителя, а также содержания в битуме асфальтенов и ПАВ, величина ориентированного слоя меняется от долей микрометра до нескольких микрометров.

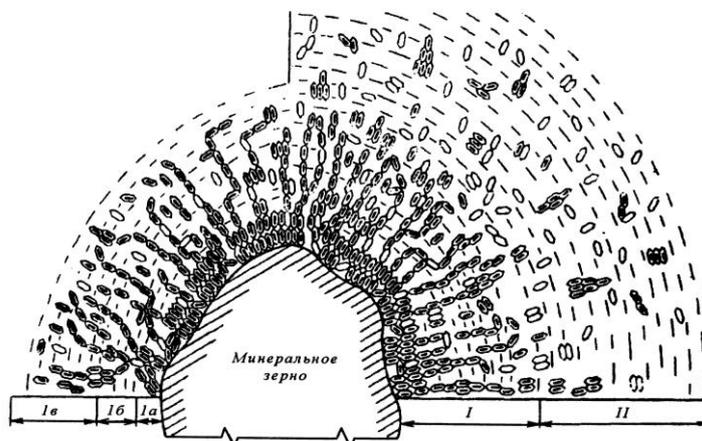


Рисунок 47 – Строение битумной пленки на минеральном зерне  
 I – ориентированный слой; II – объемный битум; Ia – твердообразная зона;  
 Ib – структурированная зона; Iv – диффузная зона

Толщина ориентированного слоя возрастает с увеличением молекулярной массы и асимметрии молекул битума. Вязкость граничного слоя меняется по мере удаления от твердой поверхности не постепенно, а скачками. Изменение вязкости граничных пленок по сравнению с вязкостью жидкости в объеме связано с ориентированным расположением молекул в граничных пленках.

На свойства битума в тонких слоях большое влияние оказывает характер поверхности, на которой адсорбирован битум. На активной поверхности с уменьшением толщины битумных слоев (меньше 10 мкм) резко увеличивается [когезия](#) вследствие ориентации структурных элементов битума. В более толстых слоях битума ориентационный эффект выражен слабее. Толщина ориентированного слоя битума на минеральных зернах наполнителя зависит от температуры: при повышении температуры – уменьшается; при понижении – увеличивается, что объясняется увеличением ассоциации молекул, эквивалентной увеличению молекулярной массы.

Наличие на поверхности минеральных материалов шероховатостей, неровностей и трещин так же способствует улучшению [хемосорбционных](#) связей. Более наглядное представление дано Ивкиным А.С., Васильевым В.В., Кондрашовой Н.К., Сухановым К.Г. и др., где распределение битума на поверхности минеральных материалов понижается от степени шероховатости в последовательности мрамор → габбро → гранит, от полного обволакивания частиц до сосредоточивания битума в виде отдельно образовавшихся капель на поверхности минерального материала.



*мрамор исходный*



*мрамор с битумом до кипячения*



*мрамор с битумом после кипячения*



*гранит*



*гранит до кипячения*



*гранит после кипячения*



*природный песок*



*природный песок до кипячения*



*природный песок после кипячения*

Рисунок 48 – Сцепление битума с поверхностью разных минеральных материалов

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 12. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

### 4. Структурные особенности и свойства АБ.

### 5. Характеристики асфальтобетонного покрытия.

#### 4. Структурные особенности и свойства АБ.

Структура асфальтобетона определяется качеством и количеством составляющих. Она сложная, так как компоненты полидисперсны, т.е. полидисперсность предопределяет полиструктуру.

Структура асфальтобетона предопределяется:

- структурой минерального остова,
- структурой битума,
- особенностями взаимодействия минеральных материалов с битумом,
- плотностью асфальтобетона,
- особенностями капиллярно-поровой структуры асфальтобетона.

*Макроструктура*, состоящая из битума и наполнителя (минеральный порошок), играет роль связующего и соединяет в монолит мелкий и крупный наполнитель.

*Мезоструктура* асфальтобетона состоит из песка и связующего, заполняет пустоты в щебне и обеспечивает требуемую плотность материала.

*Микроструктура* - объединяет мелкий и крупный наполнитель и обеспечивает прочность материала и предопределяет структуру и текстуру асфальтобетонов.

Структурообразующая роль щебня так же, как и песка, значительно отличается от роли минерального порошка. Его основное назначение заключается в формировании пространственного каркаса, обеспечивающего прочность асфальтобетона. При незначительном содержании щебня свойства асфальтобетона определяются свойствами асфальтового раствора. Зерна щебня в этом случае разделены толстыми прослойками раствора и являются в этом случае инертным наполнителем; размер, свойства поверхности, форма зерен щебня не оказывают при этом существенного влияния на свойства асфальтобетона. Иногда введение 10-20 % щебня может даже привести к снижению прочности асфальтобетона за счет снижения однородности системы. Дальнейший рост содержания щебня приводит к возникновению контактов между зернами через тонкие пленки ориентированного битума. Прочность битумных слоев настолько велика, что битум под нагрузкой практически не вытесняется. При увеличении нагрузки (уплотнения) возможно разрушение зерен в зонах контакта от сосредоточенных напряжений. При этом разрушается и битумная пленка, возникают прямые контакты по минеральным зернам, что приводит к образованию конденсационных связей. Порог формирования конденсационных связей в асфальтобетоне наступает при содержании щебня более 45 %. При увеличении количества щебня до 60-65 % в асфальтобетоне формируется пространственный каркас. Крупные минеральные зерна контактируют друг с другом непосредственно или через настолько тонкие прослойки битум, что вяжущее в них приобретает свойства твердого тела. Межзерновые пустоты минерального каркаса заполнены асфальтовым раствором. Это поровая структура асфальтобетона. Дальнейшее увеличение количества щебня приводит к формированию контактной структуры, в которой объем пустот в щебеночном каркасе значительно превышает объем асфальтового раствора, создает материал с большой пористостью и пониженной прочностью и плотностью.

Получение асфальтобетона с заданной структурой и свойствами достигается путем установления массовых соотношений между микро-, мезо- и макроструктурой и выдерживания этих соотношений при производстве смесей. Необходимо помнить,

что данной макроструктуре соответствуют только определенные мезо- и микро-структуры.

Таблица 6 – Виды структур асфальтобетона

Макро-	Мезо-	Микро-
Базальная, щебня меньше 35%	Контактно-поровая, песка больше 40%	Поровая, минерального порошка больше 15%
Базально-поровая, щебня 35-50%	Поровая и базально-поровая, песка 30-40%	Поровая базальная минерального порошка 10-15%
Поровая, щебня 50-65%	Базальная, песка меньше 30%	Базальная, минерального порошка меньше 10%
Контактная, щебня больше 65%	Базальная, песка -0	Базальная, минерального порошка -0

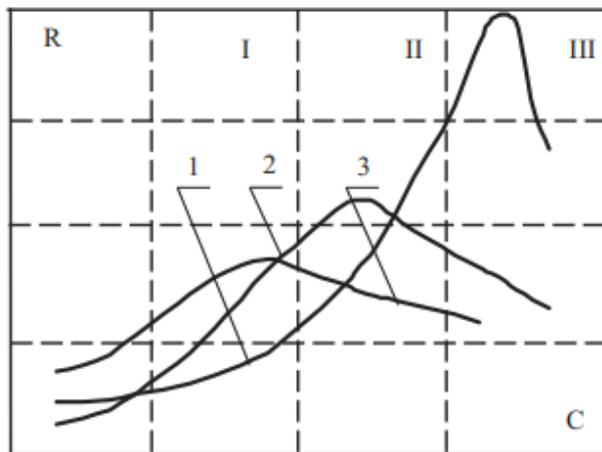


Рисунок 49 – Зависимость прочности системы R от содержания структурообразующих компонентов C:  
 1-микроструктура; 2-мезоструктура; 3-макроструктура;  
 I-базальная структура; II-поровая структура;  
 III-контактная структура;  
 приведены для асфальтовяжущего вещества



Рисунок 50 – Испытание асфальтобетонных образцов

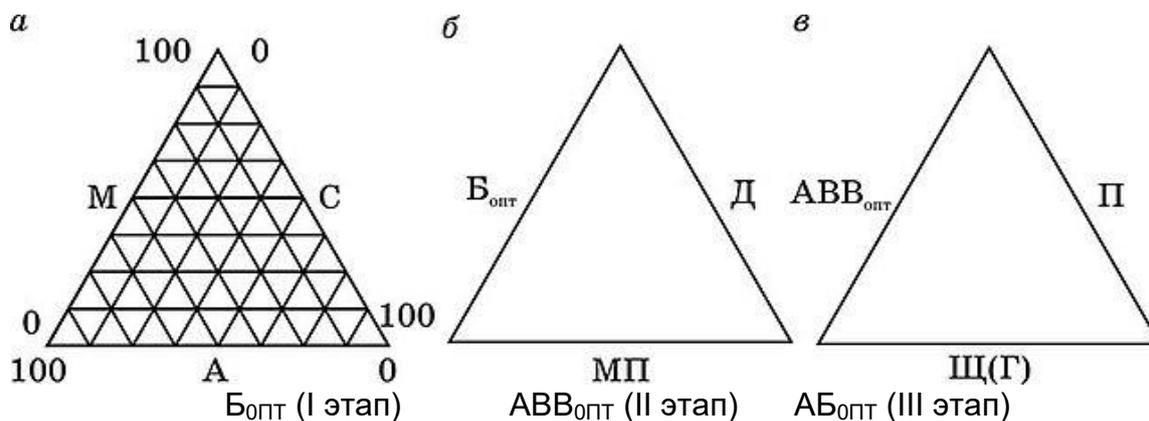


Рисунок 51 – Схема поэтапной оптимизации состава асфальтобетона:

- а - I этап - оптимизация группового состава битума  $B_{\text{опт}}$  (М - масла, С - смолы, А - сфальтены);
- б - II этап - оптимизация состава асфальтовяжущего вещества  $ABV_{\text{опт}}$  (Д - добавки, МП - минеральный порошок,  $B_{\text{опт}}$ );
- в - III этап - оптимизация состава асфальтобетона  $AB_{\text{опт}}$  ( $ABV_{\text{опт}}$ , П - песок, Щ - щебень, Г - гравий)

Технология асфальтобетона – совокупность методов подготовки щебня, песка, минерального порошка и битума, их смешения, укладки и уплотнения до заданной плотности. Цель технологии асфальтобетона – получение материала с заданными свойствами. Поставленная цель может быть достигнута при целенаправленном структурообразовании асфальтобетона, определяемом следующими технологическими периодами:

- подготовительный – выбор и подготовка компонентов, определение их соотношения в составе смеси;
- первый – активное структурообразование, которое протекает в момент объединения битума с минеральным материалом. В асфальтобетонной смеси формируются микроструктурные связи;
- второй – сближение структурных компонентов асфальтобетонной смеси при ее укладке и уплотнении. В асфальтобетоне формируется макроструктура;
- третий – стабилизация структуры и свойств асфальтобетона в покрытии под движением транспортных средств. Этот период продолжает технологический процесс и в значительной степени определяет надежность асфальтобетонного покрытия.

Каждый период структурообразования влияет на свойства системы. Чтобы получить материал с заданными свойствами, необходимо прогнозировать поведение всей системы, управлять технологией.

Первый период технологического процесса включает подогрев материалов до заданной температуры, дозирование, смешение исходных компонентов и транспортирование смеси к месту укладки. В этот период основная задача технологии заключается в разрушении первичных конденсационных контактов между частицами, равномерном распределении всех компонентов в смеси и обволакивании минеральных зерен битумом. Нормальное протекание процесса структурообразования обуславливается, прежде всего, хорошим смачиванием битумом минерального материала. При транспортировании смеси происходит дальнейшее распределение битума в асфальтобетонной смеси, а при длительной перевозке возможно расслоение смеси.

Второй период охватывает укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси; происходит дальнейшее формирование микроструктурных связей и вследствие приложения нагрузки – сближение зерен до максимальной плотности. Начинают происходить структурные деформации, заключающиеся во взаимном перемещении зерен. Макрочастицы асфальтобетонной смеси переходят в более устойчивое положение равновесия с более прочной связью между ними. При сближении частиц происходят физические процессы в пленке битума, приводящие к выжиманию ее из зон повышенного напряжения. Свободный битум заполняет межзерновое пространство, на частицах остается пленка ориентированного битума, при этом коагуляционные связи в асфальтобетоне упрочняются, прочность всей системы возрастает. В асфальтобетоне с содержанием щебня более 50 % при уплотнении тяжелыми катками происходит вырождение коагуляционных контактов в конденсационные. Ориентированный слой битума не выдавливается, а продавливается с разрушением контактной зоны зерен щебня. Во избежание этого необходимо уплотнять асфальтобетонные смеси катками на пневматических шинах или вибрационными. Прочность и долговечность асфальтобетона, уплотненного до проектной плотности при сравнительно невысоких температурах, как правило, выше, чем асфальтобетона с той же плотностью, но уплотненного при высокой температуре. Это объясняется тем, что с понижением температуры увеличивается величина ориентированного слоя битума за счет уменьшения объемного битума на минеральных частицах.

Уплотняемость связана с природой минерального материала и битума. Так, уплотняемость на известняковом материале лучше, чем на материалах из песчаника. На зернах известняка пленка битума имеет более выраженное адсорбционно-диффузное строение. У поверхности минеральной частицы больше асфальтенов, на периферии больше масел, которые способствуют уплотняемости смеси. Уплотняемость асфальтобетонных смесей связана и с формой зерен. Природный окатанный песок улучшает уплотняемость смеси. Регулировать процессы уплотнения можно за счет изменения температуры асфальтобетонной смеси. С повышением температуры смеси снижается энергоемкость уплотнения. Однако если [когезия](#) битума при высокой температуре снижается, то смесь уплотняется плохо. На практике это приводит к образованию волосных трещин после прохода катка.

Третий период характеризуется дальнейшим формированием структуры асфальтобетона под движением транспортных средств. При этом происходит доуплотнение покрытия в результате увеличения вязкости битума за счет внутренних процессов и упрочнения связей на границе раздела «минеральный материал – вяжущее»; происходит дальнейшая стабилизация ориентированного слоя битума, а также появления новообразования в зоне контакта.

Если правильно выбраны составы смесей, выдержаны все технологические процессы, то асфальтобетон в покрытии под воздействием автомобилей упрочняется. Если же допущены отклонения от заданного режима, то в заключительный период происходит разупрочнение структуры асфальтобетона. Наиболее распространенным нарушением является недоуплотнение. Массовые разрушения асфальтобетона в начале эксплуатации связаны с малой водо- и морозостойкостью пористого (недоуплотненного) асфальтобетона.

Асфальтобетон – материал с так называемыми обратимыми структурными связями. Это означает, что при разной температуре и под действием разной нагрузки он будет проявлять разные качества.

Выделяют следующие периоды состояния асфальтобетона:

- упруго-хрупкий – минеральный остов фиксирован прослойками битума. В этом состоянии асфальтобетон наиболее близок к цементам;
- упруго-пластичный – минеральные зерна соединены прослойками битума, которые при воздействии нагрузки проявляют упругость и эластичность;
- вязко-пластичный – минеральный остов соединен полужидким битумом, который при нагрузке сразу же деформируется.

Значение имеет степень сохранения присущих асфальтобетону свойств во всех трех состояниях. Реологические процессы формирования упруго-вязко-пластичных систем неразрывно связаны с их релаксационной природой, а сама релаксация напряжений в значительной мере зависит от температуры. Особенностью работы асфальтобетона, по сравнению с цементным, является резко выраженная зависимость двух основных реологических характеристик – прочности и вязкости – от температуры.

#### 5. Характеристики асфальтобетонного покрытия.

В процессе проектирования состава смеси стремятся создать такую оптимальную структуру асфальтобетона, которая обеспечит требуемые эксплуатационные характеристики устраиваемого покрытия в заданных условиях эксплуатации. Под требуемыми эксплуатационными свойствами качества по сдвигустойчивости, трещиностойкости, водо-, морозостойкости и другим критериям.

Таблица 7 – Показатели физико-механических свойств плотных асфальтобетонных смесей

Показатели физико-механических свойств плотных асфальтобетонов из смесей марки I типа Б	
Наименование показателя	Нормы для смеси марки I
Пористость минеральной части (остова), % по объему, не более, для смеси типа Б	20,0
Остаточная пористость, % по объему, для смеси типа Б	2,5-5,0
Водонасыщение, % по объему, для смеси типа Б	1,0-4,0
Набухание, % по объему, не более	0,5
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 50°С, не менее, для смеси типа Б	1,1/0,9
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре 0°С, для смеси типа Б	1,5-3,5
Индекс трещиностойкости, не менее, для смеси типа Б	0,5
Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении в агрессивной среде, не менее, для смеси типа Б после 14 сут после 28 сут	– 0,75/0,70
Коэффициент морозостойкости после 50 циклов замораживания-оттаивания, не менее, для смеси типа Б	0,80
Однородность по коэффициенту вариации значения предела прочности при сжатии при температуре 50°С, не более	0,15
<i>Примечание — В числителе приведены значения для горячих смесей, в знаменателе — для теплых</i>	

Зерновой состав влияет не только на структурные и эксплуатационные свойства, но и во многом определяет технологические свойства смеси. К технологическим относятся удобоукладываемость, уплотняемость, однородность, удобообрабатываемость и другие свойства, характеризующие смеси на стадии строительства.

В качестве основных характеристик асфальтобетона обычно подразумевают проверенные на практике показатели физико-механических свойств.

Таблица 8 – Показатели сдвиговых свойств асфальтобетонной смеси

Предел прочности при сдвиге при температуре 50°С и индекс сопротивления пластическим деформациям асфальтобетонной смеси типа Б, марки I		
Показатель сдвигоустойчивости	Предел прочности при сдвиге при температуре 50°С, МПа, не менее	Индекс сопротивления пластическим деформациям, не менее
2,7	2,7	2,7
2,5	2,5	2,5

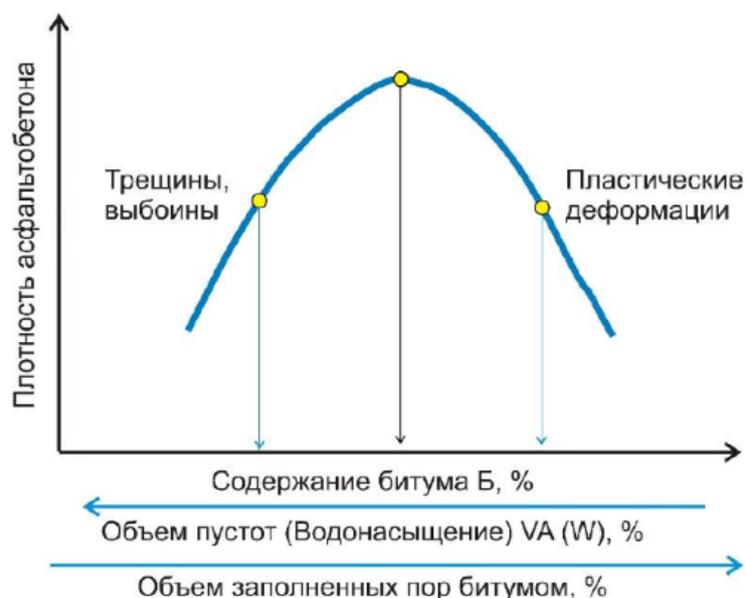


Рисунок 52 – Общий принцип оптимизации содержания битума в асфальтобетоне

Апробированные на практике зерновые составы минеральной части асфальтобетонных смесей стандартизованы в большинстве стран мира с учетом области их применения, причем в большей части они согласуются между собой.

[Вернуться в оглавление](#)

### Лекция 13. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

6. [Релаксация и устойчивость АБ к атмосферным воздействиям.](#)

7. [Регенерация АБ.](#)

8. [Активационные технологии.](#)

#### 6. Релаксация и устойчивость АБ к атмосферным воздействиям.

Деструкция асфальтобетона связана, прежде всего, с изменением свойств битумного вяжущего во времени. Изменяется его групповой состав в сторону увеличения тяжелых фракций (асфальтенов и смол). Процессами, вызывающими необратимые изменения химического состава и свойств битумов в асфальтобетонах, являются:

- испарение летучих компонентов, происходящее в поверхностных слоях битума незначительной толщины и зависящее от содержания летучих компонентов, вязкости битума, температуры;
- оксиполимеризация углеводородов битума, происходящая на внешней поверхности вяжущего под действием света и ультрафиолетовых лучей;
- полиоксиконденсация, происходящая под действием кислорода.

Асфальтобетон чувствителен к изменению температуры воздуха. Это является источником постоянных структурных изменений. Битум представляет собой коллоидную структуру, в которой соотношение дисперсионной среды и дисперсной фазы зависит от температуры. При одновременном воздействии циклических механических нагрузок (воздействие колес автомобилей) изменение пластичности приводит к нарушению структуры, к потере деформационной устойчивости покрытия и разрушению материала. Характерными дефектами асфальтобетонного покрытия является появление и развитие остаточных деформаций в виде наплывов, волн, гребенок, колеи и др.



Поперечное трещинообразование усталостного характера



Продольное трещинообразование усталостного характера

Рисунок 53 – Дефекты дорожного покрытия

Республика Беларусь является государством с однородным климатом, не имеющим широкого температурного и влажностного варьирования. Соответственно, в Республике Беларусь выбор применяемого вяжущего, а также необходимость применения модификации будут обусловлены не климатическими особенностями района строительства, а интенсивностью движения на рассматриваемом участке строительства и конструктивным положением слоя. Особенностью отечественного климата является большое количество переходов температуры через 0 °С (циклы замораживания-оттаивания) в осенне-зимне-весенний период, интенсивное использование соли при зимнем содержании дорог

и большое количество осадков в течение всего года. В связи с этим коррозионным свойствам асфальтобетона необходимо уделять повышенное внимание.

Важным моментом на стадии содержания дорожных асфальтобетонных покрытий является постоянный мониторинг за их состоянием. Продлить срок службы дорожного покрытия до капитального ремонта можно за счет применения различного рода мероприятий содержания. Кроме того, постоянно ведутся работы по созданию новых материалов и технологий. В частности, разработаны составы и технологии получения тонкослойных литых эмульсионно-минеральных смесей (сларри сил, чип сил, микросюрфейсинг и др.), бетонов на органо-гидравлических вяжущих, полимерных многокомпонентных добавок для выпуска модифицированных битумов и асфальтобетонов с заданными свойствами, асфальтобетонов с использованием вторичного сырья (регенерация). Регенерация позволяет частично решить проблему утилизации старого асфальтобетона.

### 7. Регенерация АБ.

Регенерация асфальтобетона – технология переработки старого асфальтобетонного материала, предусматривающая восстановление и улучшение его характеристик с целью повторного использования при асфальтировании, а также проведении других дорожных работ. Переработка старого асфальтобетона является ресурсосберегающей технологией, которая позволяет существенно снизить материалоемкость дорожно-ремонтных работ и работ, связанных с асфальтированием дорожных покрытий и созданием верхних слоев основания.

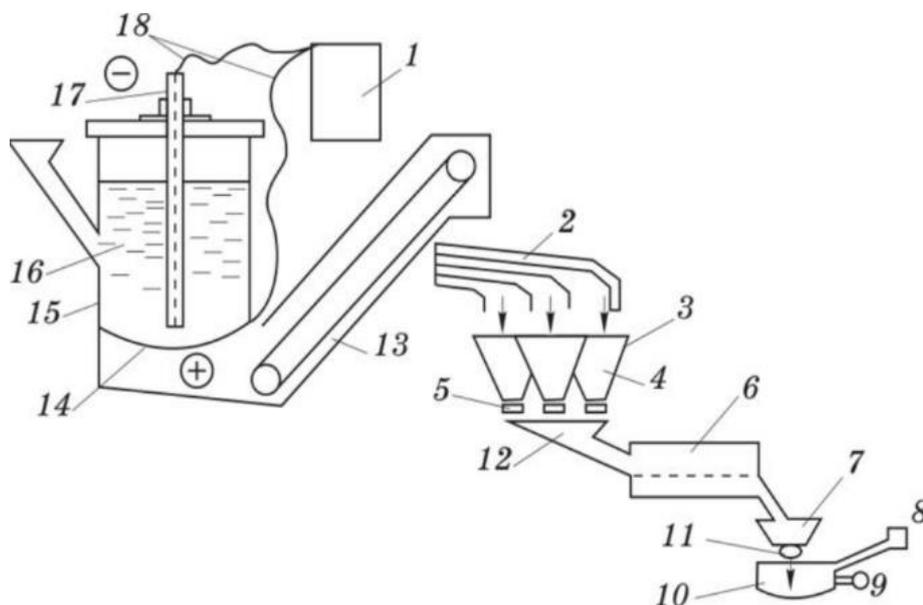


Рисунок 54 – Технологическая схема переработки старого асфальтобетона:

- 1 – генератор импульс-токов (ГИТ); 2 – грохот; 3 – бункер;
- 4 – отсек для хранения, 5 – дозатор; 6 – нагреватель (сушильный барабан);
- 7 – накопитель горячей минеральной смеси; 8 – дозатор вяжущих материалов;
- 9 – дозатор минерального порошка; 10 – смеситель;
- 11 – дозатор горячей минеральной смеси; 12 – загрузочная воронка;
- 13 – ковшовый элеватор; 14 – электрод-катод в виде сита;
- 15 – разрядная камера с рабочей жидкостью;
- 16 – рабочая жидкость (вода);
- 17 – электрод-анод;
- 18 – высоковольтные шлейфы для включения электродов в цепь ГИТ

Регенерация старого асфальтобетонного материала может осуществляться:

- на асфальтобетонном заводе, когда переработка предварительно снятого старого асфальтобетонного материала осуществляется в стационарных или передвижных смесительных установках;
- на месте проведения работ, когда регенерация старого асфальтобетонного материала осуществляется непосредственно в процессе асфальтирования с помощью специальной дорожно-строительной техники (термопрофилировщиков, асфальтовых разогревателей, ремиксеров, ресайклеров и др.).

Основные виды регенерации старого асфальтобетона:

- *горячая регенерация* – предусматривает нагревание старого асфальтобетонного материала и смешивание с другими компонентами (новой асфальтобетонной смеси, пластификатора и т.п.);
- *холодная регенерация* — восстановление старого асфальтобетонного материала без его разогревания (как правило, с добавлением органических и/или минеральных вяжущих, каменного материала, а также добавок, улучшающих характеристики регенерированного материала).

#### 8. Активационные технологии.

В настоящее время установлено, что все материалы, независимо от их агрегатного состояния, находящиеся в обычных условиях в химически пассивном состоянии, могут при комплексной механической обработке мгновенно стать более энергетически активными, способными к значительным межмолекулярным взаимодействиям на границе раздела фаз. На протяжении последних 200 лет использовались следующие технологические приемы: варьирование температуры и давления, механическое и химическое диспергирование (тонкое раздробление и растворение материалов), а также химический катализ. И сравнительно недавно появились первые публикации об искусственной активации материалов, приводящей к увеличению их прочности и долговечности за счет инициирования хемосорбционных межфазных взаимодействий между структурными компонентами.

В основу общей гипотезы *активационно-технологической механики (АТМ)* положена идея оптимизации условий для проявления наиболее активного состояния минеральных компонентов и вяжущего в момент их технологических контактных взаимодействий. Гипотеза опирается на следующие положения.

В нормальном (естественном) состоянии на поверхности частиц минеральных компонентов асфальтобетона молекулярные связи скомпенсированы. Вследствие этого поверхности частиц энергетически пассивны и при взаимодействии с органическим вяжущим не удается достичь значительной (*хемосорбционной*) прочности их связи в контактных зонах. При простом объединении минеральных компонентов (тем более из кислых горных пород) и органических вяжущих между ними возникают *адгезионные* связи в основном физического характера, при этом структура (например, асфальтобетона) по-прежнему остается коагуляционной, т.е. склонной к ползучести. Поскольку все материалы состоят из молекул, связи между которыми имеют электрическую природу, возможно направленное регулирование энергетической активности поверхности контактирующих материалов с помощью методов электронно-ионной технологии (ЭИТ). Энергетически воздействуя на частицы минеральных компонентов, искусственно придавая их поверхности электрический заряд того или иного знака или «раскалывая» частицы и генерируя их «радикальный» отклик, можно управлять интенсивностью молекулярного сцепления частиц друг с другом, т.е. эффективно управлять процессом структурообразования в таких сложных дисперсных системах, как асфальтобетон. Процессы, связанные с применением ЭИТ, носят физико-

химический характер и составляют первую стадию направленного управления структурообразованием асфальтовых систем. Они должны предшествовать смешению активированных компонентов асфальтобетона. Вторая стадия его направленного структурообразования предусматривает оптимизацию динамического состояния дисперсных систем (по Н.Б. Урьеву) путем эффективного использования вибрационных воздействий. Это позволяет обеспечивать наиболее благоприятные условия для перемешивания активированных компонентов и создавать однородные смеси, которые после их уплотнения формируют структуру готового продукта - дорожного покрытия.

Таким образом, на основе изложенных исходных положений можно сформулировать **общую гипотезу АТМ**. Если на компоненты битумо-минеральных материалов воздействовать так, что при этом полностью реализуется их способность к активному взаимодействию на электронно-ионном уровне, можно целенаправленно регулировать процессы адгезионного взаимодействия фаз на границе их раздела. При этом открывается реальная возможность усилить адгезионные контакты поверхностей частиц минеральных материалов, имеющих кислую природу, с органическими вяжущими (вплоть до хемосорбционного уровня). Прочной адгезионной связи на границе раздела «кислого минерального материала и органического вяжущего» можно достичь при наличии между ними достаточного уровня удельных разнополярных электростатических взаимодействий.

Таблица 9 - Способы активации компонентов асфальтобетона и асфальтобетонной смеси

Вид материала	Способ активации	эффект
Битум и другие органические вяжущие	Тепловая обработка	Повышение подвижности молекул в зоне контакта
	Гидродинамическая кавитация. Воздействие силовых полей	Деформация смолисто-асфальтовых комплексов и освобождение активных радикалов из масляных экранов
	Электромагнитные поля	Переориентация полярных звеньев молекул вяжущего
	Ультразвуковая обработка	Разрушение асфальтенов с образованием свободных радикалов
	Радиационное воздействие	Ионизация молекул
	Электрогидравлический эффект. Комбинированная электроимпульсная обработка	Крекинг молекул
Минеральные материалы	Механическая обработка (дробление)	Аморфизация кристаллической структуры поверхности материала
	Трибоэлектрическая обработка	Ионизация поверхности материала
	Плазменная обработка	Удаление физически и химически связанной воды с поверхности
	Электрогидравлический эффект (дробление)	Образование на поверхности свободных радикалов
	Электромагнитные поля и коронный разряд	Наведенный электрический заряд на поверхности
	Радиационное воздействие. Ультрафиолетовое излучение	Возбуждение электронов на поверхности материала.
	Электризация в вихревом слое	Электризация частиц материала
Асфальтобетонная смесь	Интенсивное перемешивание	Сближение реакционноспособных компонентов битума и минерального материала
	Вибрационное воздействие	Концентрация активных молекул вяжущего в зоне контакта
	Электроперемешивание	Образование двойного электрического слоя в зоне контакта вяжущего и минерального материала

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 14. Дорожно-композиционные материалы.

1. [Основные понятия о формировании структуры ДКМ.](#)
2. [Асфальтоцементные композиции.](#)

### 1. Основные понятия о формировании структуры ДКМ.

*Композиционные материалы* – это материалы, состоящие из 2-х или более разнородных веществ, обладающие свойствами, которых нет у исходных материалов.

Композиционные строительные материалы представляют собой сложно-организованные структуры, физико-технические свойства которых определяются как свойствами исходных компонентов, так и модификацией этих свойств в результате межструктурных взаимодействий.

Полиструктурная теория композиционных строительных материалов позволяет с единых позиций рассмотреть структурообразование и разрушение строительных материалов различной природы и назначения.

*Дорожные композиты* – это целый класс композиционных материалов, основное отличие которых, как правило, состоит в сочетании 2-х и более термодинамически несовместимых вяжущих, образующих общую структуру материала. Термодинамическая несовместимость, согласно В.А. Каргину, предполагает неспособность двух веществ к образованию устойчивой однородной системы, т.е. образуется материал, способный соединяться только в виде коллоидных дисперсий или эмульсий. Это состояние определяется термодинамическим выражением:

$$T \Delta S < \Delta H,$$

где  $\Delta S$  и  $\Delta H$  – изменение энтропии и энтальпии в процессе смешения,

$T$  – температура.

Поскольку дорожные композиционные материалы термодинамически неустойчивы, их можно характеризовать как структуры с комплексным набором связей различной прочности, деформативности, сочетающие коагуляционные, конденсационные, кристаллические связи и структуры.

Различают четыре группы дорожных композиционных материалов:

- асфальтоцементные композиты (коагуляционные на органическом вяжущем и кристаллизационные на минеральном вяжущем);
- асфальтодегтебетоны дискретной структуры (частицы обработаны вяжущими различной вязкости и природы с минимальной толщиной пленки);
- асфальтодегтебетоны с добавками несовместимых термодинамически, но совместимых технологически органическими вяжущими в виде, например, эмульсий;
- бетоны, армированные дисперсными волокнами и сетками.

Этапы формирования структуры дорожных композитов:

- коллоидное состояние (коагуляция и образование кластеров);
- кристаллизация (перколяционные мостики и узлы);
- возникновение вторичной структуры;
- взаимодействие вторичных структур, укрупнение кластеров до взаимодействия их с каменными материалами наполнителя.

Процесс разрушения композитов, как правило, начинается с зарождения и развития субмикротрещин и микротрещин вследствие разрыва молекулярных и межмолекулярных связей, т.е. механические нагрузки вызывают разрывы молекулярных связей в структуре материала. Затем формируются макротрещины и магистральные трещины, развитие которых обусловлено концентрацией напряжений в вершине трещин. Повторное приложение нагрузок увеличивает

уровень накопления повреждаемости в определенный момент, их количество достигает критического и материал разрушается. Кинетика накопления повреждений зависит от температуры, уровня и времени воздействия напряжений, режима его приложения и структурных особенностей самого материала.

Анализ дорожных композитных материалов показывает, что повреждаемость может возникнуть в результате разрыва упругих связей и при достижении предельной деформации. В первом случае повреждаемость вызывается действием напряжений, которое ведет к разрыву отдельных наиболее слабых связей с последующим формированием микротрещин. Во втором - вязкопластичная деформация приводит к удалению структурных агрегатов друг от друга на расстояние, при котором теряется их взаимодействие. В реальном материале наблюдаются эти два вида повреждаемости. Процесс накопления повреждаемости проходит 3 стадии:

- идет выравнивание напряжений за счет деформации вязких связей и ориентация кластеров вторичной структуры в направлении механических воздействий и параллельно – разрушение слабых связей, но процессы упрочнения еще преобладают над процессами разрушения и прочность материала незначительно увеличивается;
- завершается агрегация кластеров вторичной структуры в направлении воздействия, и процесс разрушения преобладает;
- идет интенсивное разрушение структуры, что характеризуется формированием магистральных трещин и резким падением прочности.

## *2. Асфальтоцементные композиции.*

Асфальтоцементные композиты готовят по трем видам технологий; горячей, теплой и холодной. Горячая технология получения асфальтоцементных композитов заключается в проведении следующих мероприятий: нагревание органического вяжущего до определенной температуры, смешение компонентов, распределение смеси в дорожном полотне, ввод воды, уплотнение. Использование повышенных температур (вода, нагретая до 60-80°C), повышенная вязкость органического вяжущего, высокомарочное минеральное вяжущее – все это приводит к быстрому твердению и к проявлению эффекта «запаривания» цемента. Теплая технология (60-12°C) предусматривает использование маловязких органических вяжущих и малоактивного наполнителя, активность которого исключает эффект «запаривания». Холодная технология заключается в естественном температурном режиме, увлажнении 8-10%, введении гидравлического наполнителя и нагреве до рабочей температуры органического вяжущего. Такая технология характерна для использования комбинированных отходов производства. К асфальтоцементным композитам первого типа относятся асфальтобетон на основе доменных шлаков и холодные дегтевые смеси. Под действием воды на контактной поверхности шлаковых частиц образуются кристаллизационные связи. Такого типа АЦК обладают технологической простотой приготовления, прочность достаточно высока, но они не полностью используют потенциал гидравлического наполнителя ввиду наличия гидрофобных пленок, Асфальтоцементные композиты второго типа позволяют практически полностью использовать потенциал цемента по прочности, но по технологии процесс усложняется, поскольку идет отдельное приготовление вяжущих (два смесителя), особые дозирующие устройства и при вводе цементного теста не исключается возможность эффекта «запаривания». Для укладки необходимы распределители и мощная виброуплотняющая техника.

К АЦК третьего типа относятся блочные композитные материалы, получаемые путем объединения в одно целое по технологии крупных агрегатов асфальто- и цементобетона. Эти материалы были разработаны Гоглидзе. После укладки

первого слоя, специальными катками делают (продавливают) выдавливание рисунка требуемой конфигурации, который заполняет цементным раствором. Получается АЦК с высокой продольной жесткостью при сохранении практически высокой релаксационной способности покрытия.

Широкое применение нашли АЦК, получаемые способом отдельного бетонирования, когда по слою уплотненного щебня распределяют цементно-песчаный раствор (метод «бетохальт») или специальный цемент-полимерный раствор (метод сольвации), т.е. с помощью виброуплотнения заполняют растворами пустоты черного щебня. Возможна пропитка каркасов из щебня различными полимерными и минеральными составами. В ряде стран такой метод применяют достаточно широко (Германии, Франции) К асфальтобетонам, получаемым способом отдельного смешения, относят цементобетоны с добавками щебня, обработанными цементным раствором частицами регенерированного асфальтобетона, а также гранулированные грунты.



Рисунок 55 – Асфальтоцементобетон

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 15. Дорожно-композиционные материалы

3. Общая рабочая теория активационно-технологической механики битумно-минеральных композиций (теория перколяции).

4. Применение бетонов на ОГВ.

3. *Общая рабочая теория активационно-технологической механики битумно-минеральных композиций (теория перколяции).*

Обычно начало теории перколяции связывают с публикацией в 1957 г. работы Д. Бродбента и Дж. Хаммерсли. Авторы ввели в обиход название «теория перколяции» и рассмотрели процесс с математической точки зрения. Термин перколяция использовался для противопоставления диффузии: если в случае диффузии мы имеем дело со случайным блужданием частицы в регулярной среде, то в случае перколяции речь идет о регулярном движении (например, течении жидкости или тока) в случайной среде. Перколяция является удобной моделью для описания широкого класса явлений, которые принято называть критическими. Большинство результатов теории перколяции получено в результате компьютерного моделирования. Перколяционные процессы могут приводить к самоорганизации и образованию структур; объекты, которые образуются при перколяции, являются *фракталами*. Цепочка связанных объектов, называется в теории перколяции *кластер*. Наиболее распространенными задачами теории перколяции являются решеточные задачи: *задача узлов* и *задача связей*.

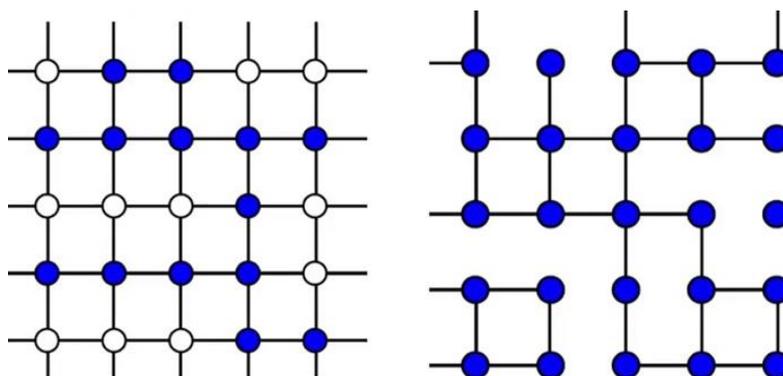


Рисунок 56 – Задача узлов и задача связей

Теория перколяции объясняет возникновение вторичной структуры и роли пороговой концентрации при зарождении вторичной структуры и завершении ее формирования. В применении к строительным композиционным материалам теория была адаптирована Б.С. Радовским, который на примере образования перколяционных мостиков определил структуру композиционных материалов, т.е. образование вторичной структуры, которая проходит типичную задачу образования «узлов». Согласно Б.С. Радовскому, образование перколяционного каркаса происходит при определенном содержании кластеров, более 0,17 (17%). Они еще редки и упрочнение структуры незначительно. Заметное влияние кластеров появляется при объемном их содержании 0,33 (33%), и влияние вторичной структуры на свойства будет проявляться при объемном содержании кластеров не менее 33% от основного вяжущего. При содержании 0,67 (67%) происходит образование сплошной сетки – решетки вторичной структуры. Материал приобретает свойства вторичного вяжущего, и дальнейшее увеличение содержания кластеров уже не будет сказываться на его свойствах. Агрегаты вторичной структуры при содержании менее 60-70% располагаются в межзерновом пространстве и взаимодействуют с каменными частицами через пленки органического вяжущего.

Взаимное расположение вяжущих относительно каменного материала будет определяться их активностью, которая неодинакова, так как эти вещества по своей природе термодинамически несовместимы и не образуют истинных растворов.

Согласно [правилу П.А. Ребиндера](#), на поверхности твердого тела будет адсорбироваться жидкость, которая своим присутствием уравнивает разность полярностей фаз между телом и оставшейся жидкостью. Если активность, определяемая диэлектрической проницаемостью, вторичного вяжущего окажется больше активности битума, но меньше, чем для каменного материала, то с каменным материалом будет взаимодействовать оно, а битум будет располагаться в межзерновом пространстве. Вторичная структура не взаимодействует с каменным материалом непосредственно и не образует сплошных «мостиков» между частицами, что объясняет разрушение образцов асфальтобетона, приготовленного на битумно-цементной композиции. Несмотря на разрушение экстрагированных образцов с содержанием вторичных структур 60-70%, они образуют кластеры, и это сказывается на гранулометрическом составе и прочности материала в конечном итоге. При малом содержании цемента изменяется количество мелких фракций. Это объясняется появлением кластеров, т.е. вторичные структуры в составе ДКМ, образованные термодинамически несовместимыми вяжущими, действуют по типу наполнителей. Но это особый наполнитель, который образован кластерами, связанными кристаллизационными и конденсационными связями, имеющими высокую прочность. Кристаллические агрегаты способны создать пространственный каркас, состоящий из более мелких агрегатов, обладающий свойствами твердообразных структур. Эти кристаллические образования взаимодействуют через высокоструктурированные прослойки органического вяжущего, приводят к резкому повышению жесткости межзернового пространства. Поэтому после появления перколяционного каркаса, когда кластеры взаимодействуют друг с другом, прочность ДКМ значительно выше, чем асфальтобетонов. Вторичные структуры обладают кольматирующим эффектом. Значительно повышается плотность бетона в 3-4 раза, при этом улучшаются такие технологические свойства, как подвижность (повышается) и удобоукладываемость. Добавка термодинамически неустойчивых, несовместимых продуктов действует в структуре ДКМ по механизму кольматирующего и армирующего наполнителя.

В настоящее время активно развивается теория о фрактальном строении дисперсных структур, в том числе и нефтяных. *Фракталы* – это объекты древовидной, коралловидной и других сложных форм, обладающие свойствами однородности и самоподобия и особенностью неплотно занимать окружающее их пространство. Термин «фрактал» (от лат. fractus – дробный, ломаный) был введен Б. Мандельбротом. Определение фрактала, данное Мандельбротом, звучит так: «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому». Распространенность фрактальных структур в природе чрезвычайно велика. Фрактальны пористые минералы и горные породы, расположение ветвей, узоры листьев, капиллярная система растений, кровеносная, нервная, лимфатическая и другие системы в организмах животных и человека, реки, облака, линия морского побережья, горный рельеф, морозные узоры на стекле и многое другое. Мало того, фрактальны практически все поверхности твердых тел. Главными свойствами фракталов являются самоподобие и иерархичность. Самоподобие – это свойство частей быть подобными всей структуре. Самоподобие предполагает, что копирование и масштабирование некоторого эталонного образа позволяет природе легко создавать сложную многомасштабную структуру. В самом простом случае небольшая часть фрактала содержит информацию о всём фрактале. Другим важным свойством фракталов является их иерархичность – способность

повторяться в разных масштабах пространства и времени. Однако существует четкий критерий принадлежности объекта к фракталам: объект нельзя считать фрактальным, если он не обладает свойством самоподобия, но можно – если он неиерархичен.

Для описания фрактальных структур, встречающихся на микромасштабах, широко используется понятие «кластер». *Кластер* – это скопление близко расположенных, тесно связанных друг с другом частиц любой природы (атомов, молекул, ионов и иногда ультрадисперсных частиц) общим количеством от двух до ста частиц, которые внутри системы сохраняют свою индивидуальность. В последнее время термин «кластер» распространяется и на системы, состоящие из большого числа связанных макроскопических частиц. Разработано множество модельных механизмов формирования фрактальных кластеров. Это во многом связано с развитием и все более широким внедрением вычислительной техники.

#### 4. Применение бетонов на ОГВ.

Бетон на органогидравлических вяжущих (ОГВ) — искусственный строительный материал, сочетающий в своей структуре свойства термодинамически несовместимых органических (битумов, дегтей) и гидравлических (цемент, гипс, зола и т. д.) вяжущих. Появление бетонов на ОГВ в дорожном строительстве было связано с рядом причин:

1. Недостаточной надежностью и долговечностью традиционного асфальтобетона на действие современных транспортных нагрузок;

2. Внедрением новых энерго- и ресурсосберегающих технологий, требующих наличия в структуре материала воды (эмульсии, вспененные битумы, влажные органоминеральные смеси и т. д.);

3. Появлением новых технологий ремонта и реконструкции дорожных покрытий (метод ресайклинга, холодного ремиксирования и др.).

Основной особенностью бетонов на ОГВ является использование в качестве вяжущих битума и цемента. В общем случае, расход битума составляет 2-4 %, цемента 3-8%. Таким образом, применение бетонов на ОГВ, позволяет использовать до 80 кг цемента на 1 тонну смеси.

Основным структурообразующим элементом бетонов на ОГВ является формирование межфазных переходных слоев кластерного типа. Поскольку гидравлические и органические вяжущие являются термодинамически несовместимыми и не могут образовать устойчивой однофазной системы, граница раздела фаз является размытой и контакты осуществляются через межфазные переходные слои. Процесс структурообразования бетонов на заключается в появлении различного рода связей прогидратировавших агрегатов гидравлического вяжущего между собой при наличии пленок органического вяжущего различной толщины. В ряде случаев возможно появление фазовых контактов между прогидратировавшими агрегатами цемента, вызванных взаимодействием продуктов гидратации. Эти контакты возникают в разрывах битумных пленок, а также и через битумные пленки небольшой толщины. Причинами их появления при наличии углеводородных пленок являются: внутрикристаллическое давление, перенос ионов вследствие диффузии, разрыв углеводородных пленок в результате контракции, частичная взаимная растворимость составляющих.

Применение бетонов на ОГВ позволит решить проблему местных проездов и жилых улиц частного сектора, где в настоящее время (по экономическим соображениям) невозможно использовать капитальные дорожные одежды.

В зависимости от состава и способа приготовления смеси на ОГВ делятся на четыре группы:

1 – смеси, состоящие из щебня (гравия), песка, гидравлического вяжущего, дорожного нефтяного битума и воды. допускается также содержание определенного количества минерального порошка (до 50 % от массы цемента);

2 – смеси, состоящие из щебня (гравия, цементогранулята), песка, гидравлического вяжущего и битумной эмульсии;

3 – смеси, состоящие из дробленого асфальтобетона (далее – асфальтогранулят (АГ)), битумной эмульсии, гидравлического вяжущего; допускается также содержание определенного (до 20 %) количества щебня (гравия, цементогранулята) и песка из отсева дробления.

4 – смеси, состоящие из асфальтогранулята, битумной эмульсии, гидравлического вяжущего; допускается также содержание определенного (до 50%) количество щебня (гравия, цементогранулята) и песка (природного или из отсева дробления).

Смеси 1, 2 и 3-й групп приготавливаются в смесительных установках, смеси 4-й группы приготавливаются смешением на дороге, в том числе при производстве работ по холодной регенерации асфальтобетонных дорожных одежд на месте.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что независимо от технологии приготовления бетона (даже при подаче воды после обработки минерального материала битумом) возникают условия для гидратации гидравлического вяжущего, связанные с наличием агрегатов цемента очень малых размеров, покрытых пленкой органического вяжущего пониженной толщины и прочности. При попадании в смесь воды и механическом воздействии происходит отрыв частиц битума от агрегатов цемента (поверхностная энергия воды выше, чем битума). Взаимодействие частиц цемента с водой приводит к возникновению щелочной среды и дальнейшему эмульгированию органического вяжущего, что способствует углублению процесса гидратации. Подобный процесс можно усилить методами электронно-ионных технологий, (ультразвуковое воздействие, электрогидравлический эффект и т.д.). Степень гидратации цемента в структуре бетона на ОГВ достигает 50-100 % по сравнению со степенью гидратации цементного камня. Меньшая степень гидратации наблюдается при подаче воды после битума. Максимальная – при применении эмульсий, отдельном приготовлении асфальтовой и цементной.

Процесс структурообразования бетонов на ОГВ заключается в появлении различного рода связей прогидратировавших агрегатов гидравлического вяжущего между собой при наличии пленок органического вяжущего различной толщины. В ряде случаев возможно появление фазовых контактов между прогидратировавшими агрегатами цемента, вызванных взаимодействием продуктов гидратации. Эти контакты возникают в разрывах битумных пленок, а также и через битумные пленки небольшой толщины. Причинами их появления при наличии углеводородных пленок являются: внутрикристаллическое давление, перенос ионов вследствие диффузии, разрыв углеводородных пленок в результате контракции, частичная взаимная растворимость составляющих. Экспериментальные исследования прочности образцов после экстрагирования битума, анализ прочности ненарушенной и разрушенной структур подтвердили возможность появления фазовых контактов. Однако учитывая незначительную прочность фазовых контактов при наличии пленок органического вяжущего, они не являются главным структурообразующим фактором бетонов на ОГВ. Основным структурообразующим элементом бетонов на ОГВ является формирование межфазных переходных слоев кластерного типа. Поскольку гидравлические и органические вяжущие являются

термодинамически несовместимыми и не могут образовать устойчивой однофазной системы, граница раздела фаз является размытой, и контакты осуществляются через межфазные переходные слои. На формирование межфазных слоев оказывают влияние как физические (прораствание кристаллов, [адсорбция](#), разрушение ассоциатов битума, перенос ионов, образование двойных электронных слоев), так и химические процессы. Экспериментально подтвердить наличие переходных слоев кластерного типа можно методами фотоэлектронной спектроскопии.

Бетоны на ОГВ сочетают свойства коагуляционных, конденсационных и кристаллизационных структур (по академику Ребиндеру П.А.). Структуру подобных материалов можно представить в виде феноменологической модели с комплексным набором упругих и вязкопластических связей, чередующихся по последовательной и параллельной схемам. В результате теоретических и экспериментальных исследований были установлены следующие принципиальные положения:

1. Степень неоднородности цементной фазы (степень перемешивания) влияет на прочностные и деформационные свойства. Чем выше неоднородность, тем ниже прочность. В то же время «степень перемешивания» и прочность цементной фазы обратно пропорционально влияют на скорость разрушения композита. Увеличивая неоднородность цементной фазы и снижая ее прочность, можно добиться заметного эффекта по улучшению трещиностойкости материала.

2. В целом для сохранения надежности материала с точки зрения трещиностойкости и сохранения высокой однородности не следует создавать материалы со сплошным кристаллизационным каркасом высокой прочности. Цементная фаза должна выполнять роль дискретно-упрочняющей и дискретно-армирующей системы.

Направленно регулировать прочностные и деформационные свойства бетонов на ОГВ можно путем изменения их микро- и макроструктуры.

Долговечность бетонов на ОГВ при действии статической нагрузки определяется их составом и степенью развития кристаллизационной структуры. Изменение свойств бетонов на ОГВ во времени, и процессы старения отличаются от процессов в асфальтобетоне. Асфальтобетон подвержен постоянной деструкции, причем наиболее интенсивно — в начальный период. Бетоны на ОГВ с низкой степенью гидратации вначале имеют степень деструкции аналогичную асфальтобетону, затем упорядоченность структуры резко возрастает. В целом высокая морозостойкость и низкая степень деструкции под действием погодноклиматических факторов подтверждает хороший уровень «взаимодействия» органических и гидравлических вяжущих в структуре бетонов на ОГВ. Связано это, прежде всего, с наличием переходных слоев кластерного типа с определенной энергией химической связи. В перспективе для приготовления бетонов на ОГВ могут оказаться эффективными методы электронно-ионной технологии, разработанные Я.Н. Ковалевым. Данные методы позволяют в комплексе изменять как структуру вяжущих, так и снижать затраты энергии на приготовление смесей.

#### *Пример условного обозначения*

Смесь на ОГВ 1-й группы, щебеночная, мелкозернистая, для бетона марки I по общему уровню надежности, на портландцементе, для устройства верхних слоев покрытия, горячая:

**Смесь на ОГВ 1 Щ Мз I (ПЦ) Пз СТБ 1415.**

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 16. Основные методы исследования и контроля качества строительных материалов и изделий.

1. [Методы исследования строительных материалов.](#)
2. [Системы контроля качества промышленной продукции.](#)

### 1. Методы исследования строительных материалов.

На сегодняшний день существует множество путей исследований непосредственно самих материалов и изделий, конструкций, которые позволяют получить точные данные о процессах формирования структуры и образования новых химических соединений, изучаемых на микро- и молекулярно-ионном уровнях.

Петрографический метод. Этот метод используется в основном для исследований неорганических материалов: различных горных пород, минералов, цемента, цементного камня, бетонов, стекла, шлаков, керамики. Исследования проводятся с помощью микроскопов различных конструкций: от обычных световых, позволяющих рассмотреть структуры с расстоянием между элементами до 0,25 мкм, до электронных - порядка 0,01...0,10 нм.

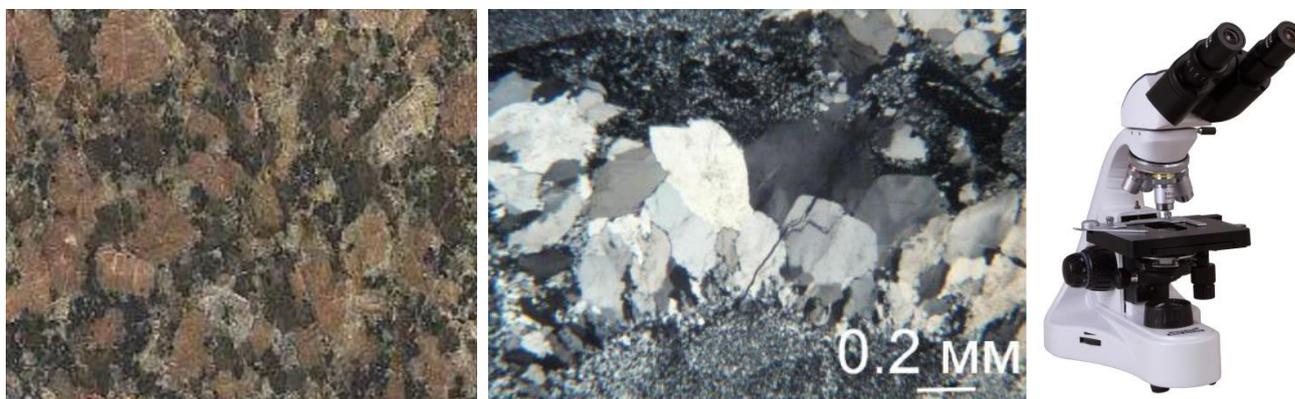


Рисунок 57 – Петрографический метод

Электронная микроскопия. Этот метод применяется для исследования тонких структур. Современные электронные микроскопы имеют полезное увеличение до  $10^6$  раз. Такое глубокое проникновение в мир малых частиц стало возможным благодаря использованию в микроскопии электронных лучей, длина волны которых во много раз меньше, чем у видимого света. Электронный микроскоп позволяет изучить размеры и форму отдельных кристаллов, процессы диффузии, фазовые превращения при тепловой обработке и охлаждении материалов, механизмы деформации и разрушения субмикроскопических структур материалов. В настоящее время используются растровые РЭМ (сканирующие) и магнитно-просвечивающие электронные (ПЭМ) микроскопы.



Рисунок 58 – Электронная микроскопия

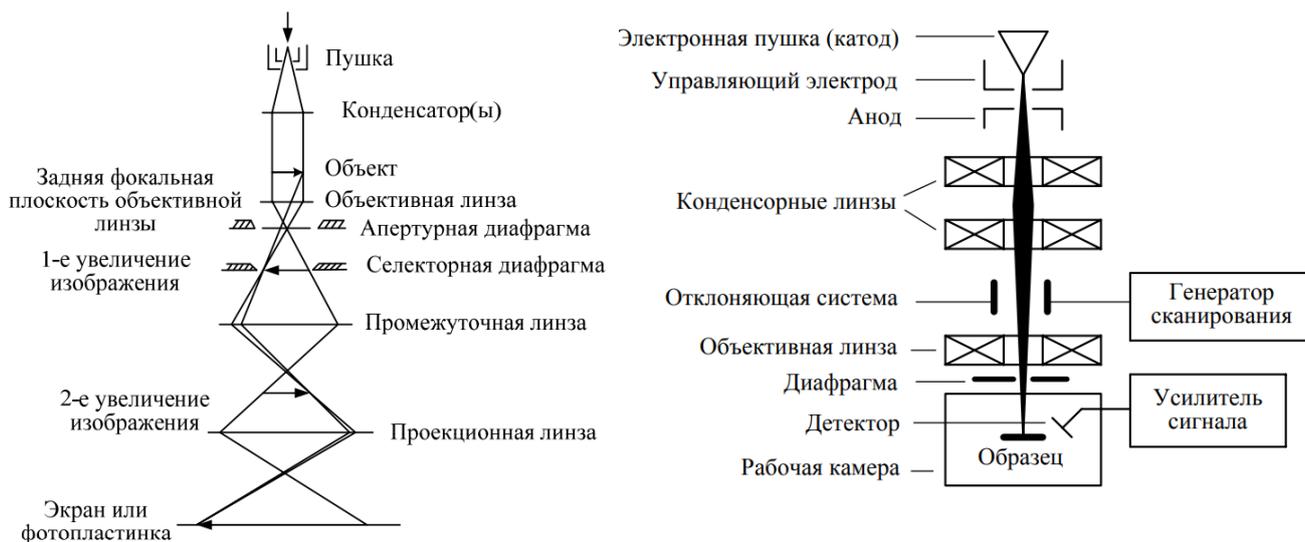


Рисунок 59 – Схема просвечивающего и сканирующего электронных микроскопов

Метод инфракрасной спектроскопии. Метод состоит в получении и исследовании спектров в ИК-области излучения. Изучают колебательные и вращательные спектры молекул и определяют по ним химический состав и структуру веществ, например, исследуют структурные изменения битумов и их эмульсий. Инфракрасная техника позволяет измерять температуру нагретых тел на расстоянии, что может использоваться в качестве датчиков температуры в технологических процессах получения строительных материалов и контроля за их качеством.

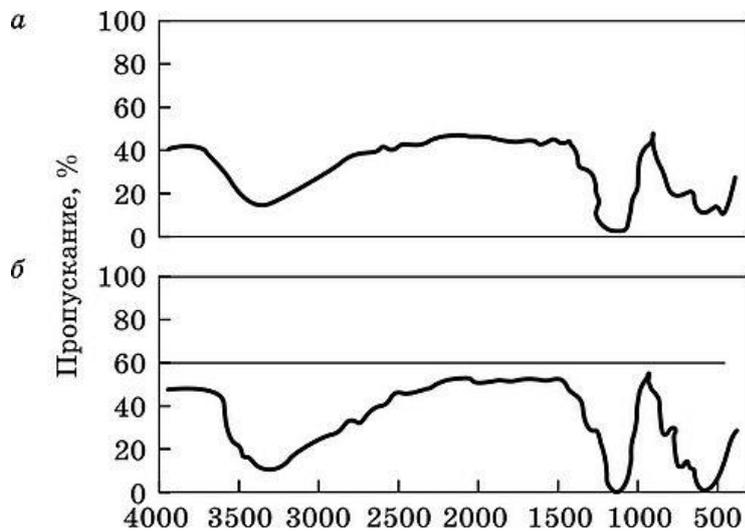


Рисунок 60 – ИК-спектры поглощения цементного камня без добавки (а) и с добавкой (б)

Рентгенографический (рентгеноструктурный, рентгенофазовый) анализ. Это метод исследования структуры и состава вещества путем экспериментального изучения дифракции рентгеновских лучей в этом веществе.

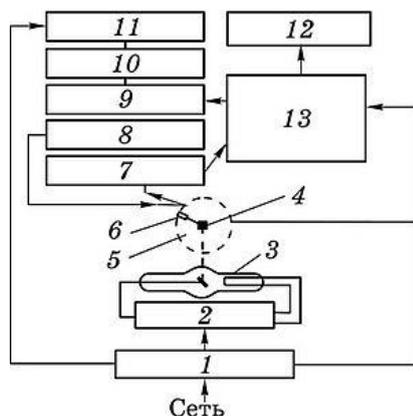


Рисунок 61 – Принципиальная блок-схема ионизационной установки для рентгеноструктурного анализа:

- 1 - стабилизатор; 2 - генератор; 3 - рентгеновская трубка; 4 - образец;  
 5 - гониометр; 6 - счетчик квантов; 7 - усилитель; 8 - выпрямитель;  
 9 - интегрирующая схема; 10 - ламповый вольтметр;  
 11 - самопишущий потенциометр; 12 - электромеханический счетчик;  
 13 - пересчетная схема

Дифференциально-термический анализ (ДТА) используется для определения минерально-фазового состава строительных материалов. Основа метода состоит в том, что о фазовых превращениях, происходящих в материале, можно судить по сопровождающим эти превращения тепловым эффектам. Прибор для проведения ДТА называется *дериватографом*.

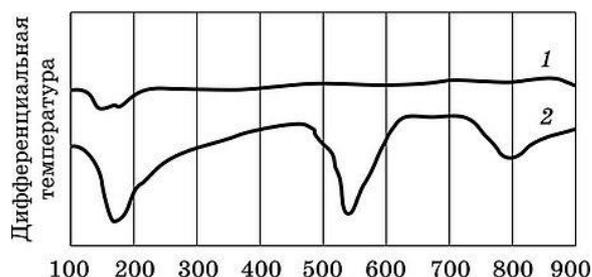


Рисунок 62 – Термограммы цемента:

- 1 - негидратированного; 2 - гидратированного в течение 7 сут

Колориметрические методы. Эти методы основаны на изменении светопоглощения растворами окрашенных соединений. Светопоглощение в исследуемой жидкости сравнивается с поглощением в эталонной (с известным содержанием компонента), после чего по соотношениям, известным как закон Бугера-Ламберта-Бера, рассчитывается концентрация с точностью  $10^{-3} \dots 10^{-8}$  моль/л (в зависимости от рода анализируемого вещества). Цвет растворов определяется с помощью специальных приборов - *фотоэлектроколориметров*.

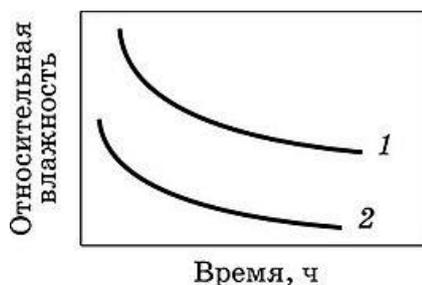


Рисунок 63 – Колориметрическое определение сравнительной оптической плотности растворов при определении адгезионной прочности битумных пленок, покрывающих песок

- 1 - песок без аутигенной пленки, обработанный битумом;  
 2 - песок с аутигенной пленкой, обработанный битумом

Оптические методы. Люминесцентный анализ. Люминесценция – свечение некоторых веществ, более высокое по сравнению с их тепловым излучением при данной температуре и возбужденное каким-либо источником энергии (возникает под действием света, радиоактивного и рентгеновского излучений, электрического поля, при химических реакциях и механических воздействиях).

Лазерный дисперсионный анализ основан на явлении дифракционного рассеяния света, которое имеет место в системах с размером частиц  $x$ , большим длины волны падающего света или сопоставимым с ней (при  $x \geq \lambda / 3$ ).

Спектральный анализ. В его основу входит: анализ испускания молекул и атомов твердого тела, их поглощение и используется неограниченный диапазон длин волн от рентгеновских до радиоволн.

Магнитоспектроскопические методы. К этим методам относятся ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).

Принципы ЯМР и ЭПР одинаковы. В методе ЯМР используется свойство ядер атомов ориентироваться в магнитном поле как малые магниты. Метод ЭПР связан с магнитным резонансом неспаренных электронов.

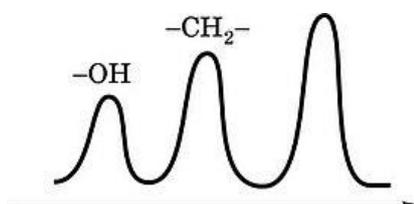


Рисунок 63 – ЯМР-спектр ядер водорода в молекуле этилового спирта

Сорбционные методы. Методы основаны на явлениях [адсорбции](#) – самопроизвольном повышении концентрации вещества на поверхности раздела фаз, сопровождающееся понижением межфазной энергии. Сорбционные методы позволяют определять пористость материалов, проводить разделение многокомпонентных смесей (хроматографический метод).

## 2. Системы контроля качества промышленной продукции.

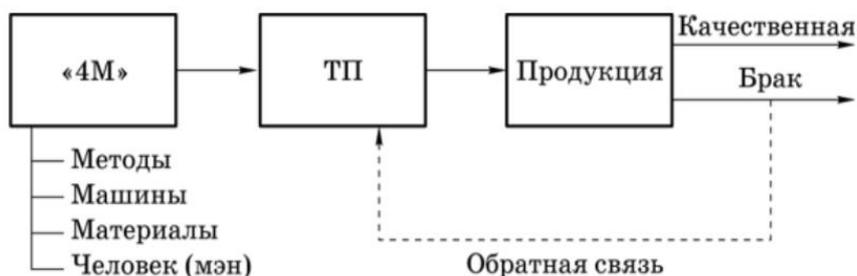


Рисунок 64 – Схема классической системы контроля качества продукции: 4М – параметры, обеспечивающие работу производства; ТП – технологический процесс

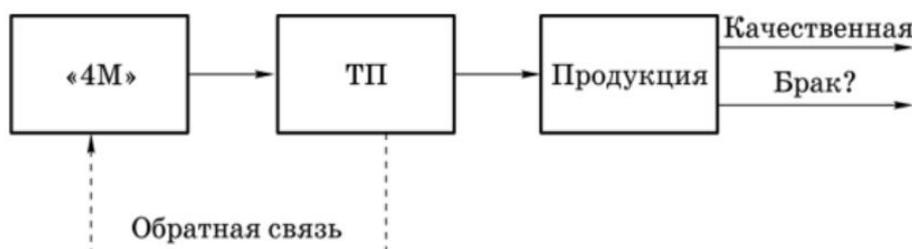


Рисунок 65 – Схема японской системы контроля качества продукции

[Вернуться в оглавление](#)

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Краткий конспект лекций для студентов специальности  
*1-70 03 01 Автомобильные дороги*

БРЕСТ 2022

УДК 691:[53+54](075.8)

Рассмотрены основные разделы курса «Физико-химические основы технологии строительных материалов»: теоретические основы дорожно-строительного материаловедения, основные закономерности структурообразования дорожных бетонов на цементных, битумных и органогидравлических вяжущих; вопросы влияния структуры на механические свойства и долговечность дорожных покрытий. Кратко описаны основные методы исследования строительных материалов.

Для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги. Может быть полезна студентам и магистрантам строительных специальностей.

Составитель: Шалобыта Т.П., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, к.т.н., доцент

Рецензенты: д.т.н., профессор, Тур В.В., заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов УО БрГТУ;  
к.т.н., доцент, Сырица Г.В., директор РУП «Сертис» РУП «Белстройцентр».

Учреждение образования

© «Брестский государственный технический университет», 2022

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Современная культура, существование человечества базируются на использовании технологий. Добыча и переработка полезных ископаемых и пищевых продуктов, резание, точение, плавление, полировка – без технологических процессов не обходится ни энергетика, ни пищевая промышленность, ни электроника, ни медицина, ни другие отрасли жизнеобеспечения человека. Одна из важнейших отраслей – строительная, развивается в направлении создания новых высокоэффективных материалов, технологий, оборудования на основе физико-химических законов, определяющих структуру и свойства материалов в условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Целью учебной дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» является получение комплексного представления о физико-химических основах технологии производства дорожных и строительных материалов. Так как прогресс в технологии производства и устройства дорожных покрытий тесно связан с физико-химическими представлениями, то физическая химия и физико-химическая механика в дорожном и строительном материаловедении являются теоретической основой технологии дисперсных строительных материалов.

Курс лекций по дисциплине «Физико-химические основы технологии строительных материалов» базируется на фундаментальных исследованиях в области естественных наук, связанных с проведением различных физико-химических и механических процессов, в результате которых получают дорожно-строительные материалы с разнообразными характеристиками. Курс содержит материал таких дисциплин как физическая и коллоидная химия, бетоноведение, дорожно-строительные материалы и изделия, ПАВ в дорожном строительстве, дорожные композиционные материалы, вопросы модифицирования и переработки асфальтобетонов и др.

История развития наук о строительных материалах и технологиях уходит в далекое прошлое. Профессор И.А. Рыбьев выделяет три основных, не одинаковых по продолжительности этапа развития, между которыми нет четких разделительных границ. Главным критерием для их выделения во времени является состояние производства, поскольку его совершенствование во многом определялось потребностями общества в материалах.

Первый этап (до 1-й пол. XIX в.) является наиболее длительным по времени. Исходной точкой отсчета начала развития признан момент получения керамики путем осознанного изменения структуры глины при ее обжиге.

Второй этап (2-я пол. XIX в. – 1-я пол. XX в) характеризуется созданием новых материалов и их массовым производством, основанным на бурном развитии технологий, промышленности, строительством многочисленных инженерных сооружений. Кроме того, развитию способствовали новые открытия в области исследования составов, структуры и оценки свойств материалов. Ярким примером является открытие в 1912 г. явления дифракции рентгеновских лучей, что позволило создать фундаментальный физический метод изучения структуры различных материалов. Второй этап существенно отличается от первого. На первом этапе устанавливались лишь общие связи между атомно-молекулярным составом веществ и их свойствами, на втором этапе главным стало всестороннее изучение конкретных материалов, создаваемых для возводимых строительных объектов, обеспечение их высокого качества за счет постоянного развития и совершенствования технологий. Наблюдается также начало четкой дифференциации исследований применительно к запросам отдельных производств материалов. На этом этапе каждая отрасль производства получала от науки максимум информации о необходимом для нее сырье, способах его переработки, объективных методах оценки свойств готовой продукции, ее стандартизации и путях дальнейшего улучшения качества.

Третий этап развития науки о строительных материалах и технологиях охватывает современный период, начавшийся со 2-й половины XX в. Для него характерны следующие особенности:

1) дальнейшее расширение объема производства традиционных и появление новых материалов; при этом наблюдается возросший уровень теоретических исследований применительно к конкретному виду материалов и технологий;

2) интеграция научных знаний о строительных материалах и технологиях. Физико-химическая механика, (основоположник – академик П.А. Ребиндер), сложилась как наука о явлениях и закономерностях, происходящих в технологических процессах, и объединила пространства научных исследований и технологических регламентов.

На современном этапе наука о материалах представляет собой систему обобщенных взглядов и характеризуется коренным пересмотром критериев прогрессивных технологий с выходом их на оптимальные значения. При этом четко прослеживается действие законов развития материи в системах «структура — состав — свойства» с научной конкретизацией категории «оптимальная структура материала». Для искусственных материалов определяющей является технология, так как именно она в основном позволяет формировать оптимальную структуру.

*Технология* – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Задача технологии как науки – выявление физических, химических, механических и других закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных производственных процессов. Основными элементами технологического процесса являются сырье, энергия и аппаратура (оборудование). Они тесно связаны между собой, взаимно обуславливают друг друга и зависят от состояния экономики и научно-технического прогресса в отрасли.

Основными критериями эффективности технологии является качество производимой продукции, ее себестоимость и экологические характеристики технологии. Качество продуктов технологии – строительных материалов и изделий определяется совокупностью их свойств.

Одним из основных принципов технологических процессов производства дорожных и строительных материалов высокого качества является комплексность использования различных методов воздействия на исходное сырье и полученный материал.

## **2. ФИЗИКО-ХИМИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

Дисперсные системы широко распространены в природе и играют важную практическую роль, чем и определяется не только научное, но и народнохозяйственное значение коллоидной и физической химии. Природные воды, облака, дым, почва, глина – все это примеры природных дисперсных систем.

*Дисперсная система* – это система, в которой большая совокупность мелких частиц одного или нескольких веществ равномерно распределены между частицами другого вещества.

*Дисперсной фазой* называют мелкие частицы вещества, которое распределено в системе. *Дисперсионной средой* называют вещество, в котором распределена дисперсная фаза. Дисперсная система может быть гомогенной и гетерогенной.

Важной характеристикой дисперсных систем есть степень измельчения частиц дисперсной фазы или степень дисперсности ( $D$ ) – это величина, обратная размеру частицы( $d$ ) – мера раздробленности вещества

$$D = 1/d, \text{ м}^{-1} \quad (1)$$

Чем меньше размер частицы, тем больше дисперсность системы.

Из уравнения следует, что чем меньше размер частиц, тем больше степень дисперсности системы (высокодисперсные системы) и, наоборот, чем больше размер частиц, тем меньше степень дисперсности (низкодисперсные системы). Если в системе частицы сильно различаются по размерам, то система – полидисперсна. От дисперсности частиц зависят многие свойства дисперсных систем, например, их устойчивость, оптические свойства, осмотическое давление, седиментация и т.д.

## 2.1. Классификация дисперсных систем.

### Классификация реальных систем по степени дисперсности.

**Грубодисперсные системы** – это дисперсные системы с размером частиц  $10^{-4} \dots 10^{-7}$  м. **Коллоидно-дисперсные системы** с размером частиц от  $10^{-7} \dots 10^{-9}$  м (1 – 100 нм). Коллоидно-дисперсные системы с твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой (Т/Ж) часто называют *коллоидными растворами* (*гидрозоли* или просто *золи*, если дисперсионной средой является вода).

**Молекулярные и ионные растворы** с размером частиц менее  $10^{-9}$  м.

Свойства систем существенно отличаются в зависимости от размера составляющих их частиц, однако в основу классификации положены не только дисперсность, но и свойства этих систем (таблица 1).

Таблица 1– Свойства систем различной степени дисперсности

Грубодисперсные системы	Коллоидно-дисперсные системы	Молекулярные и ионные (истинные) растворы
Гетерогенные Термодинамически неустойчивы	Гетерогенные Термодинамически неустойчивы, но устойчивы кинетически	Гомогенные Термодинамически устойчивы
Стареют со временем Частицы не проходят через бумажный фильтр Частицы не проходят через ультрафильтры (мембраны, целофан)	Стареют со временем Частицы проходят через бумажный фильтр Частицы не проходят через ультрафильтры (мембраны, целофан)	Не стареют Частицы проходят через бумажный фильтр Частицы проходят через ультрафильтры (мембраны, целофан)
Отражают свет, поэтому непрозрачны	Прозрачные, но рассеивают свет, поэтому опалесцирующие и дают конус Тиндаля	Прозрачные, неопалесцирующие, конус Тиндаля не наблюдается
Частицы видны в оптическом микроскопе	Частицы видны в электронном микроскопе, в ультрамикроскопе	Частицы не видны в современных микроскопах

Классификация по агрегатному состоянию. В зависимости от агрегатного состояния дисперсной фазы и дисперсионной среды все дисперсные системы можно разделить на 8 типов. Так как необходимым условием образования дисперсной системы является гетерогенность системы (ограниченная растворимость дисперсной фазы в дисперсионной среде), то система типа "газ в газе" не включается в данную классификацию вследствие их неограниченной растворимости друг в друге (таблица 2).

Если дисперсионной средой является жидкость, а дисперсной фазой – твердые частицы, система называется взвесью или *суспензией*; если дисперсная фаза представляет собой капельки жидкости, то систему называют *эмульсией*. Эмульсии, в свою очередь, подразделяют на два типа: *прямые*, или "*масло в воде*" (когда дисперсная фаза – неполярная жидкость, а дисперсионная среда – полярная жидкость) и *обратные*, или "*вода в масле*" (когда полярная жидкость диспергирована в неполярной). Среди дисперсных систем выделяют также *пены* (газ

диспергирован в жидкости) и *пористые тела* (твердая фаза, в которой диспергированы газ либо жидкость).

Таблица 2 – Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию

Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Условное обозначение	Примеры дисперсных систем
Жидкость	Газ	ж/г	Туман, облака, жидкие аэрозоли
Твердое тело	Газ	т/г	Дым, пыль, твердые аэрозоли, порошки
Газ	Жидкость	г/ж	Пены, газовые эмульсии
Жидкость	Жидкость	ж/ж	Эмульсии (молоко, латекс)
Твердое тело	Жидкость	т/ж	Суспензии, коллоидные растворы, гели, пасты, глины
Газ	Твердое тело	г/т	Твердые пены, пористые тела (пенопласты, силикагель, пемза)
Жидкость	Твердое тело	ж/т	Жемчуг, опал, грунт
Твердое тело	Твердое тело	т/т	Цветные стекла, сплавы, сталь, бетон

#### Классификация по межфазовому взаимодействию.

Коллоидные системы (*эмульсии, цементные, известковые растворы*), в свою очередь, подразделяются на две группы, резко отличные по характеру взаимодействий между частицами дисперсной фазы и дисперсионной среды:

а) *лиофобные* (золи) это системы, в которых слабые силы межмолекулярного взаимодействия. К ним принадлежат лиозоли, аэрозоли, эмульсии, пены. Лиофобные золи это коллоидные растворы. Эти системы могут быть получены только с затратой энергии и устойчивы лишь в присутствии стабилизаторов.

б) *лиофильные* это системы, в которых интенсивное взаимодействие между фазой и средой. К ним принадлежат растворы высокомолекулярных соединений, ВМС которые ранее называли *лиофильными коллоидами*. Растворы ВМС образуются самопроизвольно благодаря сильному взаимодействию частиц дисперсной фазы с дисперсионной средой и способны сохранять устойчивость без стабилизаторов.

#### Классификация по кинетическим свойствам дисперсной фазы.

Согласно этой классификации все дисперсные системы можно разделить на два класса: *свободнодисперсные системы* и *связнодисперсные системы*.

К *свободнодисперсным* системам относятся бесструктурные системы, в которых частицы дисперсной фазы не связаны друг с другом и способны независимо перемещаться в дисперсионной среде под влиянием теплового движения или силы тяжести. К ним относятся лиозоли, аэрозоли, достаточно разбавленные суспензии и эмульсии.

К *связнодисперсным* системам относятся системы, в которых частицы связаны друг с другом за счет молекулярных сил, образуя в дисперсионной среде своеобразные пространственные сетки (структуры). Такие частицы, не способны перемещаться, а могут лишь совершать колебательные движения. Это образованные из золь гели, концентрированные суспензии (пасты) и концентрированные аэрозоли.

### **2.2. Основные свойства дисперсных систем.**

*Броуновское движение* проявляется хаотическим непрерывным движением частиц дисперсной фазы под действием ударов молекул растворителя (дисперсионной среды), находящихся в состоянии интенсивного молекулярно-теплового движения. Перемещаться частицы могут в различных направлениях. Траектория их движения представляет собой ломаную линию неопределенной конфигурации.

*Диффузия* – это самопроизвольно протекающий процесс выравнивания концентраций ионов, молекул или коллоидных частиц вследствие их беспорядочного

теплового (для истинных растворов) или броуновского (для дисперсных систем) движения. Диффузия заканчивается с достижением равномерного распределения частиц по всему объему.

*Осмотическое давление* – избыточное гидростатическое давление на раствор, отделённый от чистого растворителя полупроницаемой мембраной, при котором прекращается диффузия растворителя через мембрану. Зависит от количества свободно движущихся частиц. Осмотическое давление коллоидных растворов ничтожно мало по сравнению с таковым в истинных растворах. Второй особенностью осмотического давления коллоидных растворов является его непостоянство. В связи с термодинамической неустойчивостью коллоидных растворов в них непрерывно протекают процессы агрегации и дезагрегации, приводящие к изменению числа осмотически активных частиц в единице объема, а, следовательно, и осмотического давления.

*Седиментация* – это самопроизвольное оседание частиц под действием силы тяжести. В свободнодисперсных системах частицы вещества, диспергированные в дисперсионной среде, находятся под действием двух противоположно направленных сил: силы тяжести и сил диффузии. В истинных растворах ввиду малой массы их частиц (молекул, ионов, атомов) силы диффузии преобладают над силами тяжести, происходит выравнивание концентраций по всему объему системы. В грубодисперсных системах, где размер частиц довольно велик, сила тяжести значительно больше сил диффузии, что способствует осаждению и концентрированию частиц на дне сосуда. Если при достижении равновесия основная масса частиц дисперсной фазы за сравнительно короткое время окажется в осадке (или всплывет), систему считают кинетически (седиментационно) неустойчивой. Это характерно для грубодисперсных систем (суспензий, эмульсий и т.п.). Если же частицы в основном остаются во взвешенном состоянии, система является кинетически устойчивой. К таким системам относятся коллоидные растворы (золи). В коллоидных растворах между силами тяжести и силами диффузии устанавливается седиментационное равновесие.

Специфика *оптических* свойств дисперсных систем обусловлена их основными признаками: гетерогенностью и дисперсностью. Дисперсные системы неоднородны по фазовому составу, поэтому для них характерна оптическая неоднородность. Прохождение света через дисперсную систему сопровождается такими явлениями, как его преломление, поглощение, отражение и рассеяние. Преобладание одного из этих явлений зависит главным образом от соотношения между длиной волны падающего света и размером взвешенных частиц. В грубодисперсных системах размер частиц превышает длину волны видимой части спектра, что способствует отражению света от поверхности частиц. Поэтому данные растворы мутные (непрозрачные). В истинных растворах размеры частиц растворенного вещества (молекулы, ионы, атомы) значительно меньше длины волны. Такие растворы оптически пусты (прозрачные).

В высокодисперсных системах (коллоидных растворах) размер частиц соизмерим с длиной волны видимого света, в результате чего в таких растворах преобладает светорассеяние. Для коллоидных неокрашенных растворов светорассеяние проявляется в виде *опалесценции*, т.е. свечения матового цвета, чаще всего голубоватых оттенков. Благодаря светорассеянию коллоидные растворы можно легко отличить от молекулярных и ионных.

### **2.3. Теоретические основы структурообразования.**

Строительные и дорожные материалы (бетоны, известь, гипс, цемент, керамика и т.д.) – это в основном грубодисперсные системы с размером частичек более  $10^{-9}$  м. Для них Ребиндером П.А. определены два основных типа пространственных структур – *коагуляционные* и *конденсационные*. В коагуляционных структурах контакт между частицами осуществляется через тонкие прослойки дисперсионной

среды и точечные контакты или при участии макромолекул. Конденсационные структуры возникают путём склеивания, сваривания, срастания частиц дисперсной фазы на отдельных участках поверхности. В коллоидном растворе в начале коагуляционного взаимодействия агрегаты из двух, трех (а иногда и целой цепочки) первичных дисперсных частиц – сохраняют текучесть (скрытая коагуляция) до образования сетки. Но уже дальнейший рост агрегатов приводит к образованию коагулята (седимента) или геля. Возникает твердообразная коагуляционная структура, которая может быть плотной или рыхлой. Свежевозникшие коагуляты во многих случаях часто переходят в состояние золь. Изотермический переход коагулята в золь называется *пептизацией*, а вызывающие его вещества – пептизаторами. Пептизаторы ионной (электролиты) и молекулярной природы стабилизируют дисперсные системы и, адсорбируясь на поверхности первичных частиц, ослабляют взаимодействие между ними, приводя к распаду агрегатов, и коагуляты переходят в золь. Со временем пептизируемость коагулятов в результате развития точечных контактов между первичными частицами уменьшается, происходит упрочнение коагуляционных структур или так называемое старение коллоидов. Проявляется оно в агрегации частиц дисперсной фазы, в уменьшении их числа и степени гидратации, в уменьшении поверхности раздела между фазами и адсорбционной способности. Прочность коагуляционных структур незначительна, так как сетчатый каркас из дисперсных частиц удерживается за счет межмолекулярных сил, которые невелики.

Для коагуляционных структур характерно явление *тиксотропии*. При механических воздействиях происходит разрушение структуры с переходом в текучее состояние и в покое – самопроизвольное восстановление структуры, как бы «отвердевание». При высушивании материалов с этой структурой коагуляционные контакты переходят в точечные, теряют пластичность и прочность материала быстро возрастает.

Конденсационные дисперсные структуры в зависимости от механизма возникновения фазового контакта разделяют на: структуры спекания (срастания) и кристаллизационные структуры твердения. Структуры спекания возникают в результате сварки, сплавления, спекания или склеивания дисперсных частиц в точках касания. Они получаются при термической обработке, когда частицы дисперсной фазы «свариваются» по местам точечных контактов. Таким образом, конденсационная структура представляют собой непрерывные каркасы дисперсной фазы и дисперсионной среды, вдвинутые друг в друга и не потерявшие дисперсности. Однако она может быть получена и при конденсации дисперсной фазы из пересыщенных растворов или расплавов. При образовании и росте зародышей новой фазы из концентрированных пересыщенных систем может возникнуть непрерывный сетчатый каркас путем срастания и переплетения растущих частиц дисперсной фазы. Если эти частицы представляют собой кристаллы, то возникающие структуры называют кристаллизационно-конденсационными структурами твердения. Сцепление элементов конденсационных структур дополняется образованием химических связей, что обуславливает значительную их прочность. Конденсационные структуры не тиксотропны и не пластичны, это упруго-хрупкие, необратимо разрушаемые структуры, в отличие от тиксотропно-обратимых коагуляционных структур.

#### **2.4. Физико-химическая механика.**

*Физико-химическая механика* – это наука о закономерностях формирования структур в разных дисперсных системах и материалах, устанавливаемых путем изучения механизма молекулярно-поверхностных явлений в процессе образования и разрушения этих структур. Знание закономерностей формирования структур позволяет получать материалы с заданными свойствами с помощью

технологических процессов переработки разнообразных веществ и материалов, применяемых в качестве исходного сырья.

Основное требование, предъявляемое к любым материалам: они должны обладать высокими структурно-механическими характеристиками, определяющими их долговечность и надежную работу в инженерной конструкции. Это достигается при максимальном приближении их прочности к прочности бездефектного твердого тела. Одной из основных причин значительного различия (часто на несколько порядков) в свойствах бездефектных твердых тел и реальных дисперсных материалов является несовершенство технологических процессов получения последних. Это относится к процессам обработки поверхности частиц исходных компонентов, их смешения (гомогенизации), транспортирования и уплотнения смеси.

Появление в структуре микронеоднородностей различных видов, стимулирующих разрушение материалов даже при пониженных напряжениях, во многом объясняется именно несовершенством технологии и является следствием определенных особенностей высококонцентрированных дисперсных систем. Основные из них проявляются в сочетании сильно развитой межфазной поверхности и большой концентрации дисперсной фазы в жидкой дисперсионной среде. Главное следствие такого сочетания заключается в том, что в концентрированных системах самопроизвольно, за счет сцепления частиц дисперсных фаз между собой, возникают термодинамически устойчивые пространственные структуры. В таких системах доминирующим является соотношение между потенциальной энергией взаимодействия (сцепления) частиц и кинетической энергией, передаваемой этим частицам в процессе технологического передела. Методика исследования высококонцентрированных дисперсных систем предусматривает, прежде всего, изучение закономерностей образования и разрушения пространственных структур дисперсных систем при воздействии на них энергетических факторов внешней среды. При исследовании структурно-механических свойств дисперсных систем на первый план выдвигается не классическая реология, главная задача которой – изучение реологических свойств систем и влияния на них отдельных факторов, а управляющая реология, требующая обоснования такого сочетания различных видов воздействий, при котором обеспечивается заданный оптимальный уровень структурно-реологических характеристик системы в течение всего технологического процесса.

Таким образом, физико-химическая механика позволяет анализировать процессы образования и разрушения структуры материалов и целенаправленно управлять ими. Она является основой современного материаловедения и технологических процессов, используемых при переработке исходного сырья и получении готовых материалов в виде сложных дисперсных систем.

## 2.5. Поверхностные явления.

Для увеличения поверхности жидкости нужно преодолеть силу внутреннего давления, т.е. совершить определенную механическую работу. Чем больше площадь поверхности жидкости  $S$ , тем большую работу (энергию) надо совершить (затратить). Эта энергия  $E_{\Gamma}$  называется *поверхностной энергией* Гиббса:

$$E_{\Gamma} = \sigma \cdot S, \quad (2)$$

где  $S$  – удельная поверхность;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, т.е. удельная работа, затраченная на образование поверхности раздела фаз.

Коэффициент *поверхностного натяжения* (или просто поверхностное натяжение) может иметь силовое и энергетическое выражение. С одной стороны поверхностное натяжение – это поверхностная энергия Гиббса единицы поверхности (т.е. удельная поверхностная энергия Гиббса). Следовательно, равна работе, затраченной

на образование единицы площади поверхности. Единица измерения  $\alpha$  в этом случае – джоуль на квадратный метр ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ). Силовое определение поверхностного натяжения формулируется следующим образом: сила, действующая на поверхности тела по касательной к ней и стремящаяся сократить свободную поверхность тела до наименьших возможных пределов при данном объеме. В этом случае единицей измерения является ньютон на метр ( $\text{Н}/\text{м}$ ).

С увеличением температуры наблюдается уменьшение поверхностного натяжения за счет ослабления молекулярных сил, в результате чего молекулы поверхностного слоя отрываются (процессы кипения, испарения). Стремление к уменьшению поверхности наблюдается и у твердых тел. В природе металлов и твердых тел границы зерен обладают избытком свободной энергии вследствие нарушения структуры, что очень важно для процессов смачивания, адсорбции, разрушения и деформации.

Для дисперсных систем одной из основных характеристик является удельная поверхность частиц, которая может быть определена на специальных устройствах. *Удельная поверхность* – это сумма всех поверхностей  $S$  такого числа частиц, общий объем  $V$  которых равен  $1 \text{ см}^3$ . Таким образом, с увеличением размера частиц удельная поверхность уменьшается и наоборот. При дальнейшем дроблении дисперсной части исчезает поверхность раздела между частицей и средой и образуется гомогенная система (молекулярная смесь или истинный раствор). Явления, происходящие на поверхности раздела фаз имеют огромное значение,

на них основаны такие процессы, как: обогащение руд, смазка, поглощение вредных газов, смачивание твердой поверхности и др.

Поверхностное натяжение твердого тела непосредственно измерить невозможно, но всегда поверхностное натяжение твердого тела значительно больше, чем поверхностное натяжение жидкости. На этом основан процесс *смачивания* – один из основных процессов получения дорожных строительных материалов. Приготовление широко распространенных строительных материалов (цементо- и асфальтобетонов, керамики, пластмасс, мастик) обязательно включает важную технологическую операцию - покрытие твердой фазы (частиц минеральных материалов) жидкой дисперсной средой (водой, битумом, полимером, эмульсией). Это делается для придания системе подвижности и осуществления формования изделия. В отдельных случаях создания каркасных материалов или защиты бетонных и каменных конструкций от коррозии широко используют пропитывание пористых материалов специальными жидкостями. В обоих случаях происходит *смачивание*. Мерой смачивания является *краевой угол смачивания*  $\theta$ , образующийся между касательной к поверхности жидкости. Краевой угол отсчитывается в сторону жидкости. Условие равновесия капли на твердой поверхности при контактом смачивании определяется соотношением поверхностного натяжения на трех границах фаз (жидкой, твердой, твердожидкой) согласно уравнению Юнга:

$$\sigma_{\text{тг}} = \sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}} \cdot \cos\theta, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{тг}}$  – поверхностное натяжение на поверхности раздела фазы твердое тело-газ;  
 $\sigma_{\text{тж}}$  – поверхностное натяжение твердожидкой фазы;  
 $\sigma_{\text{жг}}$  – поверхностное натяжение на поверхности фазы жидкость-газ;  
 $\cos\theta$  – косинус краевого угла смачивания.

Краевой угол смачивания острый – поверхность *гидрофильная*, краевой угол смачивания тупой, косинус угла меньше 0, но больше 1 – поверхность *гидрофобная*. По числу фаз, участвующих в процессе, различают два типа смачивания: *иммерсионное смачивание*, когда твердое тело полностью погружается в жидкость, и *контактное смачивание*, которое протекает с участием трех фаз: твердой, жидкой и газообразной (например, капля жидкости на твердой поверхности).

*Когезией* называют притяжение однородных молекул, атомов или ионов, обусловленное всеми видами межмолекулярного и межатомного взаимодействия внутри одной фазы. Простейший пример когезии – прочность однородных веществ в жидком состоянии (битум, деготь, полимер) или в виде твердого тела (прочность асфальтобетона). Таким образом, когезия определяет существование вещества в твердом и жидком состояниях, которые характеризуются высокой когезией. Газообразные вещества обладают малой когезией.

*Адгезия* – слипание разнородных молекул твердых или жидких тел. Адгезия является причиной склеивания двух разных веществ за счет действия физических или химических межмолекулярных сил.

Работа когезии равна энергии, которую нужно затратить на преодоление сил сцепления между молекулами данной фазы. Численно работа когезии ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ) равна удвоенному значению поверхностного натяжения:

$$W_k = 2\sigma, \quad (4)$$

Работа адгезии – это работа, затрачиваемая на отрыв молекул одной фазы от молекул другой фазы. По величине работы адгезии можно прогнозировать прочность адгезионной связи (прилипания, склеивания). Работу адгезии также выражают в  $\text{Дж}/\text{м}^2$ . Формой адгезии является смачиваемость, т.е. способность прилипания жидкости к твердому телу. При разрыве образуются две поверхности и исчезают фазовые границы, что согласуется с законом Дюпре. Для случая адгезии в системе твердое тело-жидкость, уравнение имеет вид:

$$W_a = \sigma_{\text{ТЖ}}(1 + \cos\theta), \quad (5)$$

Работа адгезии тем больше, чем сильнее молекулярное притяжение жидкости к твердой поверхности, т.е. лучше смачивание. Если работа адгезии меньше половины работы когезии, то жидкость не смачивает твердую поверхность.

Процессы поглощения газов или растворенных веществ твердыми материалами и жидкостями называются *адсорбцией*. Это поверхностный процесс, заключающийся во взаимодействии молекул или ионов адсорбата (газа или растворенного вещества) с поверхностью адсорбента за счет сил Ван-дер-Ваальса, водородных связей и электростатических сил.

Классическое уравнение адсорбции – это уравнение Гиббса, которое показывает соотношение между адсорбцией и изменением поверхностного натяжения с концентрацией разбавленного раствора:

$$\Gamma = - \frac{\partial \sigma}{\partial C} \frac{C}{RT}, \quad (6)$$

где  $\Gamma$  – адсорбция, моль/ $\text{см}^2$ ;

$C$  – равновесная концентрация, моль/л;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $8.31 \text{ Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$ ;

$T$  – абсолютная температура, К.

*Хемосорбция* - разновидность адсорбции, которая протекает под действием сил основных валентностей, т.е. сопровождается химическим взаимодействием. Хемосорбция зависит от природы фаз. При повышении температуры она усиливается. Хемосорбция практически необратима и приводит к образованию прочных поверхностных (буферных) слоев между адсорбентом и адсорбатом.

## 2.6. Поверхностно-активные вещества.

*Поверхностно-активными веществами (ПАВ)* называют такие химические соединения, которые адсорбируются на поверхностях раздела жидкостей и твердых тел и влияют на их физико-химические или химические свойства. ПАВ являются, как правило, соединениями, молекулы которых состоят из двух главных частей – радикала и функциональной группы.

**Радикал** – представляет собой группу атомов, которая при ряде химических превращений неизменна и переходит из молекулы одного соединения в молекулу другого. Радикалы образуются, например, при отщеплении в молекулах углеводородов органических соединений атомов водорода. Так, если в любом предельном (насыщенном) соединении, относящемся к классу парафинов типа  $C_nH_{2n+2}$ , отщепляется атом водорода, то оставшаяся группа атомов  $C_nH_{2n+1}$  является алифатическим (жирным) радикалом.

Место отщепленного водорода в молекуле может занять другой атом или группа атомов, обладающих определенными свойствами, связанных со стационарным смещением электронов на атомных орбитах, что обуславливает наличие определенного электрического диполя и дипольного момента всей молекулы. Такие атомы или группы атомов называются **функциональными группами**.

Наиболее часто встречающиеся в составе ПАВ функциональные группы:

- гидроксильная: (– OH);
- карбоксильная: (– COOH);
- альдегидная: (– COH);
- аминная (аминогруппа): (– NH<sub>2</sub>);
- нитрогруппа: (– NO<sub>2</sub>);
- сульфогруппа: (– SO<sub>3</sub>H).

По количеству функциональных групп в молекуле ПАВ могут быть одно-, -двух- и многоосновными.

Соединения, в которых алифатический радикал содержит менее 10 атомов углерода, как правило, не обладают поверхностной активностью, т.е. способностью адсорбироваться и понижать поверхностное натяжение жидкостей или поверхностную энергию твердых тел. При содержании в радикале более 10 атомов углерода они обычно поверхностно-активны и называются **высшими жирными ПАВ**.

Классификация ПАВ по способности образовывать ионы и заряду ионов.

Принципиально все ПАВ разделяют на две большие группы: *ионогенные* соединения, при растворении в воде диссоциирующие на ионы, и *неионогенные*, которые на ионы не диссоциируют.

В зависимости от того, какими ионами обусловлена поверхностная активность ионогенных веществ – анионами или катионами, ионогенные вещества подразделяются на *анионоактивные*, *катионоактивные*, *амфотерные*. Анионоактивные ПАВ активны в щелочных растворах, катионоактивные – в кислых, амфотерные – в тех и других.

Анионоактивные вещества в щелочных растворах, образуя отрицательно заряженные поверхностно-активные ионы (анионы):



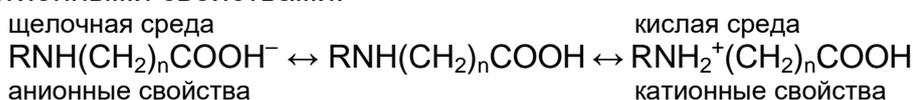
Катионоактивные вещества при диссоциации в кислых растворах образуют положительно заряженные поверхностно-активные ионы (катионы):



К анионоактивным ПАВ относятся: карбоновые кислоты (RCOOH) и их соли (RCOOMe) и др.

К катионоактивным ПАВ относятся амины, аммониевые основания: RNH<sub>2</sub>; RNH<sub>3</sub>Cl.

Амфотерные ПАВ содержат две функциональные группы, одна из которых имеет кислый, другая – основной характер, например карбоксильную и аминную группу. В зависимости от среды амфотерные соединения обладают анионными, либо катионными свойствами:



Неионогенные ПАВ, растворяясь в воде, не образуют ионов.

К группе неионогенных ПАВ относятся продукты оксиэтилирования жирных кислот, спиртов, аминов и др.

#### Классификация ПАВ по механизму действия

В зависимости от действия ПАВ в дисперсных системах они делятся на 4 группы:

*К первой группе* относятся низкомолекулярные, истинно растворимые в воде ПАВ, например спирты. Они являются слабыми смачивателями и пеногасителями.

*Ко второй группе* относятся ПАВ диспергаторы и эмульгаторы. Адсорбируясь, эффективно понижают свободную поверхностную энергию жидкости или твердого тела и тем самым облегчают процесс образования новых поверхностей и диспергирование. Эти вещества обладают и некоторыми стабилизирующими действиями. В результате ориентированной адсорбции ПАВ второй группы гидрофобизируют твердые поверхности и, наоборот, гидрофилизуют гидрофобные поверхности.

*В третью группу* объединены ПАВ, являющиеся хорошими стабилизаторами. Поверхностная активность их сравнительно мала. Эти ПАВ являются также хорошими адсорбционными пластификаторами – пластифицируют структуру, понижая их прочность и структурную вязкость. В цементных растворах и бетонах это позволяет переходить к жестким и вместе с тем однородным смесям, способствуют равномерности перемешивания, повышает плотность и долговечность (морозостойкость), приводит к повышению прочности и к снижению расхода цемента. В технологии получения битумоминеральных материалов эти ПАВ повышают сцепление битума с минеральными наполнителями, обеспечивают равномерное перемешивание асфальтобетонной смеси; укрепляют, стабилизируют грунты, используемые в качестве конструктивного слоя дорожных одежд.

*Четвертая группа ПАВ* – это вещества, обладающие высокой поверхностной активностью, смачивающим и гидрофобизирующим действием. Они также эффективные эмульгаторы и стабилизаторы эмульсий. В эту группу входят мыла жирных кислот и аминов.

#### Классификация ПАВ по растворимости в воде и маслах.

Растворимость ПАВ в той или иной среде зависит от молекулярной структуры, которая определяет, какие будут вещества: водорастворимые, водомаслорастворимые, маслорастворимые.

### **2.7. Основы реологии.**

*Реология* – наука о деформационном поведении твердых, вязких и эластичных материалов под нагрузкой во времени. Реологические свойства идеализированных тел – упругость, вязкость, пластичность. В основе описания деформирования однородных моно- фазных материалов обычно лежит модель идеального материала (тела), обладающего только одним фундаментальным свойством и единственной реологической характеристикой: модулем упругости  $E$ , коэффициентом вязкости  $\eta$  или пределом текучести  $\sigma_0$ . Понятие идеального тела необходимо рассматривать как давно сложившуюся схематизацию его поведения при деформировании. В результате комбинирования разного числа различных типов соединения друг с другом известных элементов идеальных реологических тел (пружина, поршень, трибометр) можно создавать реологические модели различной сложности, по своим свойствам приближающиеся к реальным (модели Максвелла, Кельвина и др.).

Особенностью строительных дисперсных материалов является коагуляционный тип их структуры, когда мелкие частицы разделены пленками вязкоупругой жидкости (битум, полимер, вода и др.), что обуславливает зависимость их прочности, модуля упругости и других характеристик от скорости деформирования. Основой такой зависимости является релаксация напряжений в жидкоподобной пленке, точнее, соотношение между временем релаксации в системе и временем воздействия на нее напряжения.

*Релаксация напряжения* с реологической точки зрения – это процесс снижения напряжения в системе при постоянной величине деформации.

Реологические процессы деформирования упруговязкопластичных систем неразрывно связаны с их релаксационной природой, а сама релаксация напряжений в значительной мере зависит от температуры. Таким образом, температура – основной фактор движения микрочастиц: флуктуаций атомов в узлах кристаллической решетки твердых тел, перемещений молекул и мицелл относительно друг друга в жидкостях. Перемещение молекул, атомов и сегментов дисперсных частиц возможно только за счет энергии теплового движения, а всякие механические воздействия, которые влияют на систему, лишь облегчают этот процесс и придают ему заданное направление. Важно знать закономерности изменения под влиянием температуры двух основных реологических характеристик – прочности и вязкости (в случае жидкости – когезии и адгезии).

Для большинства строительных материалов вязкость является важной технологической характеристикой, знание значения которой позволяет определить оптимальный режим их приготовления. Для битумов это касается режимов их подготовки (нагрев, перекачка по трубопроводам на АБЗ и перемешивание), для пластмасс – перемешивание и формование, для красок – способность растекаться и закрепляться на твердой окрашиваемой поверхности, для цементобетонных смесей и растворов – способность равномерно распределяться в форме (опалубке) и склонность к тиксотропии при применении вибрационных уплотняющих механизмов. Важно также знать закономерности изменения вязкости для термопластичных материалов (например, асфальтобетонов), т.е. материалов, которые способны при изменении температуры неоднократно переходить из твердого состояния в вязкопластичное (жидкое), и наоборот.

### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕТОНОВЕДЕНИЯ**

#### **3.1. Основы структурообразования.**

В теории бетона в настоящее время выделяют два направления:

- структурообразование цементобетона и стабильность структурных связей в материале при эксплуатационных воздействиях на инженерные сооружения;
- технологическая надежность приготовления смесей (включая расчет состава), их уплотнения (формования), что обеспечивает заданные технические требования.

Оба направления тесно связаны друг с другом и не имеют четкой границы между собой. Тем не менее, физико-химическая теория структурообразования бетона является доминирующей и предшествует разработке его технологии.

Практическое значение теории бетона заключается в научном обосновании технологии получения этого материала и его надежной работы в инженерной конструкции. Большой вклад в развитие фундаментальных общетеоретических основ технологии бетона в разное время внесли В.В.Михайлов, Б.Г.Скрамтаев, П.А.Ребиндер, А.Е.Десов, Ю.М.Баженов, Н.А.Мощанский, И.Н.Ахвердов, С.В.Шестоперов, С.М.Ицкович, А.Е.Шейкин, К.М.Грушко, Л.А.Феднер, В.Б.Ратинов и др.

При создании композиционного монолита необходим энергетический процесс для объединения этих компонентов в единое целое, т.е. процесс образования прочных структурных связей между ними. Изменяя структуру бетонов, можно изменить характеристики материала. Под понятием структуры понимают совокупность данных о строении материала, взаимное расположение структурных элементов, их количественное соотношение и взаимосвязь. Иначе под структурой понимают расположение в пространстве отдельных элементов и характеристику сил, соединяющие эти элементы.

По масштабному уровню и методам изучения различают: макроструктуру – строение, видимое невооруженным глазом, т.е. визуально; микроструктуру – строение, видимое в оптический микроскоп, и ультрамикроструктуру – внутреннее строение вещества, изучаемого методами электронной микроскопии. В зависимости от содержания зерен заполнителя различают базальную, поровую и контактную структуры.

Исследования микроструктуры веществ показали, что энергия связи (кристаллической решетки), теоретическая прочность связаны с поверхностной энергией и поверхностным натяжением. Рассматривая взаимодействие структурных единиц (ионов, атомов, молекул), расположенных внутри тела и на его поверхности, можно отметить, что в поверхностном слое эти частицы (структурные единицы) будут иметь избыток свободной поверхностной энергии, аналогично, как и в растворе. Рассматривая микроскопию как уровень изучения композитных материалов, необходимо отметить классификацию структур на этом уровне по Ребиндеру. Он разделил все микроструктуры на коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные.

Коагуляционная - это такая структура, в которой связь между частицами осуществляется через прослойки жидкой фазы за счет относительно слабых молекулярных сил (Ван-дер-Ваальсовы силы). Материалы с такой связью обладают подвижностью, пластичностью, тиксотропностью, но невысокой прочностью. Конденсационная - структура, в которой контакт между частицами осуществляется за счет химических, валентных ионных связей. Это материалы, обладающие высокой прочностью, хрупкостью, необратимостью при механических и термических разрушениях. Кристаллизационная – структура, в которой контакт между частицами образуется путем срастания их с образованием пространственной сетки или каркаса с более или менее правильным строением. Все эти три типа микроструктур сочетаются в природе в реальных телах.

Для ультрамикроскопического уровня структуры вещества характерно определенное взаимное расположение атомов, а также прочность и направленность связей между ними. В зависимости от размеров атомов, природы связей между ними образуются структуры различной плотности.

Основными структурообразующими компонентами бетона являются цемент и вода, а также мелкий и крупный заполнители из природных и искусственных материалов.

Цемент состоит из минералов клинкера:  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (алит),  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (белит),  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (трехкальциевый алюминат),  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (четырекальциевый алюмоферрит); оксидов  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , и других веществ в незначительном количестве. Особенности микроструктуры основных компонентов цемента заключаются в следующем. Во всех перечисленных соединениях присутствует  $\text{CaO}$ . Атом кальция легко теряет два электрона своей внешней оболочки и превращается в  $\text{Ca}^{2+}$ -ион. В таком виде он вступает в химические реакции с другими веществами, образуя новые соединения.

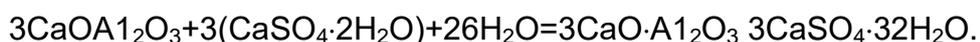
В химических соединениях цемента присутствует также диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . При контакте кремния и кислорода к двум атомам кислорода переходят все четыре электрона атома кремния. В результате образуются прочные ионные связи  $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$ . Для инициирования связи атома кремния с атомом кислорода необходимо, чтобы их электроны пришли в энергетически возбужденное состояние, что достигается при высоких температурах.  $\text{SiO}_2$  входит во все сложные химические соединения в виде комплексного аниона в форме цепочек и пространственной сетки.

Оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  относится к типу кристалла гексагональной системы, кристаллическая решетка которой обладает отрицательным зарядом, что позволяет ей участвовать в более сложных соединениях в качестве аниона. Из атомов

алюминия может создаваться кристаллическая решетка в особых случаях, когда образуются устойчивые молекулы  $Al_2$ , имеющие некоторую аналогию с молекулой  $H_2$ . Для соединения с кислородом молекула  $Al_2$  должна быть предварительно разрушена и переведена в ионную валентную форму. При этом атомы алюминия возбуждаются и в таком состоянии могут присоединиться к трем атомам кислорода ( $Al_2O_3$ ). Высокая температура является эффективным средством возбуждения, при котором молекула  $Al_2$  переходит в валентное состояние. Этот процесс осуществляется при получении цементного клинкера во время обжига исходной смеси.

Соединение, входящее в один из клинкерных минералов цемента –  $Fe_2O_3$ , представляет собой кристалл гексагональной системы – гематит; это соединение обладает свободной валентностью.

Все образующиеся в цементном клинкере химические соединения обладают ионной кристаллической структурой, легко гидратируются и образуют раствор. При размалывании клинкера к нему для регулирования начала схватывания цементного геля добавляют 1...4 % гипса. При взаимодействии воды с портландцементом в присутствии гипса из перенасыщенной жидкой фазы интенсивно кристаллизуется труднорастворимый гидросульфоалюминат кальция (эттрингит):



Эттрингит кристаллизуется на поверхности цементных зерен и формирует на ней полупроницаемую гелевую оболочку, обладающую большой экранирующей способностью. Вследствие этого в начальный момент взаимодействия цемента с водой скорость гидратации цемента значительно снижается.

Непосредственный контакт поверхности гелевой оболочки с еще не гидратированной поверхностью зерна цемента отсутствует, т.е. в процессе формирования экранирующих оболочек образуется зона перехода. Размеры этой зоны определяются радиусом действия ван-дер-ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия на ее границе. Благодаря им возникающие новообразования коллоидных размеров удерживаются вблизи поверхности цементных зерен.

Таким образом, цемент – это сложное химическое вещество, состоящее из различных соединений и способное совместно с водой давать новообразования, скрепляющие минеральные заполнители в единый прочный монолит.

Вода – активный химический компонент, участвующий в процессах структурообразования цементного геля. Несмотря на сравнительно простую формулу ( $H_2O$ ), структура воды изучена пока недостаточно, а свойства ее (в частности pH) сильно изменяются при воздействии различных электромагнитных полей. Вода – неоднородная жидкость. Ее молекулы могут существовать в трех формах: одиночные молекулы (гидроль) –  $H_2O$ , двойные молекулы (дигидроль) –  $(H_2O)_2$ , тройные молекулы (тригидроль) –  $(H_2O)_3$ . В жидком состоянии вода представляет собой смесь всех трех форм молекул, соотношение между которыми зависит от температуры и других факторов. Молекулы воды характеризуются большой устойчивостью. Однако сама молекула воды во многом подобна ионам: ее можно рассматривать как ион кислорода  $O^{2-}$  с присоединенными к нему двумя ионами водорода  $H^+$ . Такое соединение ионов придает молекуле воды свойство ориентирования в электрическом поле: своим положительно заряженным концом молекула направлена к отрицательному полюсу, а отрицательно заряженным – к положительному. Такое строение и ориентировка молекул определяет большой дипольный момент воды, что, в свою очередь, придает молекуле воды способность к поляризации, характеризующейся диэлектрической проницаемостью. Этим в некоторой мере объясняется аномальная способность

воды растворять различные вещества, молекулы которых соединены главным образом ионной связью.

Молекулы воды связаны между собой водородной связью, что обуславливает огромную силу их сцепления, проявляющуюся в поверхностном натяжении воды и ее значительной адгезионной способности по отношению к другим веществам. Такие особенности воды инициируют размягчение материалов, контактирующих с ней.

При взаимодействии с твердым телом структура и свойства воды претерпевают качественные изменения; они тем значительнее, чем тоньше пленки воды на поверхности или между поверхностями твердых тел и интенсивнее силы поляризации. У сплошных массивных тел, линейные размеры которых составляют десятки и сотни сантиметров, поверхность единицы объема невелика и явления, происходящие на поверхности раздела фаз, не имеют существенного значения. Напротив, в дисперсных и особенно в коллоидных системах удельная поверхность очень велика и с уменьшением крупности частиц быстро возрастает. При взаимодействии молекул с твердым телом, обладающим гидрофильными свойствами, его поверхность покрывается тонким слоем воды, которая удерживается адсорбционными силами. Источником этих сил является некомпенсированность ионных или молекулярных сил на поверхности раздела двух фаз или в межфазном поверхностном слое (например, в капиллярах).

Основой адсорбционных процессов является господствующий во всех явлениях природы всеобщий закон, выражающийся в тенденции систем самопроизвольно уменьшать запас свободной энергии. Стремясь снизить свою поверхностную энергию и нейтрализовать электрический заряд, дисперсная частица притягивает к себе молекулы воды, имеющие дипольную структуру.

На поверхности частиц твердой фазы адсорбируются не только молекулы воды. Большинство частиц, состоящих из ионных кристаллов, имеют отрицательный заряд, и поэтому около их поверхности скапливаются катионы, находящиеся в воде. Эти катионы образуют вокруг частиц два слоя: адсорбционный и диффузный. Адсорбционный слой располагается около поверхности частиц, а за ним следует диффузный слой ионов. Явление связывания воды рассматривают как разновидность феномена гидратации частиц, протекающей в две стадии. Вначале под влиянием поверхностных сил разрываются первичные водородные связи между молекулами воды, а затем они вступают в водородную связь с кислородными и гидроксильными группами на поверхности частиц. Гидратация, создаваемая ионизированными группами (ионная гидратация), протекает полнее, и молекулы воды тем прочнее удерживаются на поверхности минеральных частиц, чем больше соответствие кислородных и гидроксильных групп упорядоченной структуре молекул воды, ориентированных в их электрическом поле. О механизме связывания воды имеются различные точки зрения, однако все они сходятся на том, что основную роль играет силовое поле притяжения вблизи поверхности минеральных частиц. Об этом свидетельствуют исследования, выполненные с помощью ядерного магнитного резонанса и радиочастотной спектроскопии. Показано, что молекулы воды у поверхности частиц, взаимодействуя с ионами кристаллической решетки, притягиваются к ней, уменьшается амплитуда колебаний молекул воды, увеличиваются ее плотность, вязкость и сопротивление деформациям.

Молекулы воды образуют не только пленки вокруг частиц, но и проникают внутрь их кристаллических решеток, если они относятся к раздвижному типу. В этом случае связанная вода будет образовываться также внутри самих кристаллических решеток в межпакетном пространстве. Адсорбционный слой воды может быть как мономолекулярным, так и полимолекулярным. Толщина пленки воды, состоящей из адсорбционного и диффузного слоев (сольватная оболочка), зависит от минералогического состава (химического потенциала), размера и формы частиц,

химического состава адсорбированных ионов и от внешних условий (атмосферного давления и температуры).

Частицы твердой фазы, имеющие различный минералогический состав, обладают различной степенью гидрофильности, т.е. активностью по отношению к воде, а поэтому они с неодинаковой силой взаимодействуют с диполями воды. При одинаковом минералогическом составе на частицах большего размера образуются более толстые пленки воды, чем на частицах меньшего размера. Это явление объясняется тем, что в непосредственной близости от поверхности частиц твердой фазы силовое поле мало зависит от их размера, и поэтому степень притяжения первого адсорбционного слоя воды примерно одинакова у частиц различной крупности. По мере же удаления от поверхности напряжение силового поля изменяется неодинаково – на одном и том же расстоянии от поверхности напряжение будет меньшим у мелких частиц с большей кривизной поверхности, чем у более крупных. Специфические свойства адсорбированной воды с различной молекулярной структурой существенно влияют на процессы формирования физико-механических свойств цементного геля и его превращение в твердое тело. Образование аномальных граничных слоев воды в зависимости от структуры поверхности минеральной частицы, на которой происходит ее зарождение, обуславливается также наличием на границе раздела твердой и жидкой фаз двойного электрического слоя (ДЭС). Формирование двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности соприкасающихся фаз, как и адсорбция, обуславливается стремлением гетерогенной системы к уменьшению поверхностной энергии. Последнее вызывает определенное ориентирование полярных молекул, ионов или электронов в поверхностном слое. Вследствие этого соприкасающиеся фазы приобретают заряды противоположного знака, но равной величины. Образование ДЭС возможно по механизмам:

1. В процессе диссоциации твердого вещества с поверхности.

2. В результате преимущественной избирательной адсорбции на поверхности раздела фаз ионов электролитов, не входящих в состав веществ, которые образуют дисперсную фазу. Это могут быть электролиты-примеси или, как например, при получении коллоидного раствора методом конденсации, избыток одного из электролитов.

### **3.2. Основные положения теории двойного электрического слоя.**

Современная теория строения ДЭС мицелл основана на представлениях Штерна. Согласно этой теории ДЭС состоит из двух слоев: внутреннего (адсорбционный) и внешнего (диффузный). Толщина первого не более двух диаметров ионов, а второго – во много раз больше, так как он имеет размытое строение из-за теплового движения ионов.

Адсорбционный слой располагается на твердой поверхности и состоит из двух рядов ионов противоположных знаков. Непосредственно на поверхности твердой фазы сорбируются потенциалопределяющие ионы на расстоянии, равном их радиусу в несольватированном состоянии, и поверхность приобретает электрический заряд. В результате электростатического притяжения из раствора поступает часть противоионов, которые образуют второй слой ионов, противоположного знака. Но эта часть противоионов располагается в жидкой фазе и двигается вместе с твердой частицей. Остальная часть противоионов располагается также в жидкой фазе, но представляет собой размытую (диффузную) ионную оболочку. Причем, концентрация противоионов, наибольшая около заряженной поверхности твердой фазы, убывает по мере увеличения расстояния от границы раздела. При движении частицы в электрическом поле противоионы диффузного слоя не перемещаются вместе с ней. Разность потенциалов в адсорбционном слое между потенциалопределяющими ионами и всеми противоионами называется электротермодинамическим потенциалом. Его величина

зависит только от количества адсорбированных потенциалопределяющих ионов. Это число может изменяться в зависимости от условий проведения опыта и методов очистки полученного золя. Неподвижный адсорбционный слой содержит только часть противоионов. Они понижают заряд твердой поверхности, обусловленный потенциалопределяющими ионами. Этот, частично нейтрализованный заряд, и противоионы диффузного слоя создают разность потенциалов между неподвижной и подвижной частями двойного электрического слоя, т.е. между гранулой и диффузным слоем. Эта разность потенциалов называется электрокинетическим потенциалом. Ее обозначают греческой буквой  $\zeta$  (дзета) и потому часто называют  $\zeta$ -потенциал. Под действием электрического поля мицелла как бы разрывается на границе между адсорбционным и диффузным слоями (эта граница называется поверхностью скольжения), и частица (гранула) получает заряд, соответствующий  $\zeta$ -потенциалу. Поверхность скольжения может находиться на разном расстоянии от поверхности фазы, и соответственно будет разной величина  $\zeta$ -потенциала. Его значение в первую очередь зависит от толщины диффузного слоя. Установлено, что с увеличением толщины диффузного слоя возрастает заряд гранулы и, следовательно, увеличивается  $\zeta$ -потенциал.

По мере увеличения объема воды затворения сверх того количества, при котором образуются сольватные оболочки, часть ее располагается между сольватированными частицами и механически удерживается в «порах» цементного геля. По своим свойствам эта вода, как и поверхностные слои диффузной воды, может быть отнесена к рыхлосвязанной (диффузной). Содержание поровой жидкости в цементном геле может изменяться в зависимости от внешнего давления, приложенного при его уплотнении (обработке). При механических воздействиях, например при центрифугировании, вакуумировании и др., происходит отслоение (отжатие) поровой жидкости из цементного геля и тем значительнее, чем больше величина внешнего давления. Формирование коагуляционной структуры цементного геля сопровождается сжатием (контракцией) его объема. Механизм контракции цементного геля обусловлен следующими физико-химическими процессами:

- 1) достижением полного смачивания частиц и вытеснением с их поверхности адсорбированного воздуха;
- 2) сорбцией воды поверхностью и наружными порами смачиваемых частиц, сопровождающейся более плотной упаковкой ориентированных молекул пленочной воды;
- 3) образованием ионной среды вокруг частиц цемента (в результате поверхностного растворения составляющих минералов), ведущим к увеличению количества связанной воды;
- 4) изменением плотности частиц цемента и «воды» при образовании кристаллогидратов.

Бетон — типичный пример композиционного материала, отличающийся сложностью структуры, количеством и характером компонентов, особенностями межфазовой поверхности, имеющей большое значение при воздействии внешней среды. При рассмотрении бетона как полиструктурного материала в зависимости от характера и механизма процессов структурообразования выделяют:

- микроструктуру – структуру цементного камня;
- мезоструктуру – структуру раствора в бетоне, рассматриваемого как двухкомпонентную систему «мелкий заполнитель — цементный камень»;
- макроструктуру – структуру двухкомпонентной системы «крупный заполнитель – раствор».

Микроструктура цементного камня в первом приближении характеризуется такими составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важные технологические факторы, влияющие на формирование микроструктуры цементного

камня, – химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. Мезоструктура цементно-песчаного раствора рассматривается как конгломератная структура, с матрицей в виде цементного камня, а макроструктура – как структура, в которой матрицей служит цементно-песчаный раствор. Крупный заполнитель обуславливает макроструктуру бетона, причем особое значение имеет прочность и характер поверхности его зерен, их крупность, форма и гранулометрический состав. В известной степени свойства крупного заполнителя оказывают влияние на формирование мезо- и микроструктуры бетона, что связано с влиянием щебня на водопотребность бетонной смеси. В свою очередь, мелкий заполнитель, определяя мезоструктуру бетона, влияет на формирование микроструктуры бетона, вследствие того что песок, взаимодействуя с цементным тестом, в значительной мере обуславливает значение В/Ц бетонной смеси. Кроме того, он способствует формированию макроструктуры цементного камня, так как оптимальная толщина растворной пленки на поверхности зерен щебня определяется средней крупностью песка.

Микроструктура цементного камня значительно больше влияет на свойства бетона, чем мезо- или макроструктура. Приведенное деление структуры бетонов оправдывается тем, что механизм формирования и свойства макро-, мезо- и микроструктур принципиально отличны друг от друга.

Для описания микроструктуры цементного камня и взаимодействия с водой разработан целый ряд моделей, отличающиеся друг от друга разными взглядами на физическое состояние межслоевой воды, в соответствии с которыми первоначальные промежутки между частицами цемента заполняются цементным гелем, представленным преимущественно слабо закристаллизованными гидросиликатами кальция. Поровая структура цементного камня определяется исходным физическим состоянием свежеприготовленной смеси, а также составом продуктов гидратации, их размерами и морфологией. Из известных технологических факторов наибольшее влияние на поровую структуру оказывает водоцементное отношение. Количество воды затворения зависит от свойств цемента, тонкости помола и определяется необходимыми реологическими свойствами, обуславливающими различную водопотребность при достижении нормальной густоты цементного теста.

Между прочностью и характером структуры существует тесная связь (особенно проявляющаяся при использовании различных технологий получения строительных материалов), но оба эти свойства определяются как типом, так и объемом продуктов гидратации вяжущего, причем различные гидратные фазы обладают различной вяжущей способностью. Помимо степени закристаллизованности гидратных новообразований важную роль в создании структуры камня играет форма частиц новообразований.

Таким образом, строение и взаимосвязь элементов микроструктуры цементного камня, размеры и характер пор, соотношение между фазовыми составляющими зависят от состава продуктов гидратации, предопределяемого химико-минералогическими особенностями исходных вяжущих веществ и количеством воды затворения (при условии соблюдения оптимальной технологии приготовления и укладки бетонной смеси, времени и режима твердения). Формируемая структура бетона в значительной степени обуславливается микроструктурой цементного камня, поэтому, изменяя ее характер и учитывая особенности, можно управлять свойствами бетона в достаточно широких пределах.

Наличие заполнителя существенным образом влияет и на условия твердения цементного камня. В бетоне взаимодействия цемента с водой и его твердение происходят в тонких прослойках между зёрнами заполнителя при постоянном взаимодействии с ним. Заполнитель повышает водоудерживающую способность цементного теста, ограничивает усадочные деформации, способствует образованию

кристаллического каркаса цементного камня, влияет на изменение температуры и влажности в твердеющем цементном камне. Т.о. заполнитель оказывает существенное влияние на формирование структуры цементного камня и бетона.

Структура бетонной смеси сохраняется и при затвердевании, поэтому структуру бетона следует классифицировать по содержанию цементного камня и его размещению в бетоне (плотная, ячеистая, зернистая). Наибольшей прочностью обладают материалы с плотной структурой, а наименьшей – с зернистой.

### **3.3. Коррозия бетона.**

При эксплуатации зданий и сооружений важно оценить характер и опасность повреждений. Причины, вызывающие повреждения, а затем и разрушения зданий: воздействия внешних природных и искусственных факторов; воздействия внутренних факторов, обусловленных технологическим процессом; проявление дефектов, допущенных при изысканиях, проектировании, возведении здания; недостатки и нарушения правил эксплуатации зданий, сооружений и оборудования. Чаще всего здания и конструктивные элементы преждевременно выходят из строя от суммарного воздействия вышеперечисленных факторов. Разрушение железобетонных конструкций может быть результатом коррозии как бетона, так и арматуры. В первом случае окружающая среда агрессивна по отношению к бетону, а потому он разрушается; при этом обнажается и разрушается арматура. Если же окружающая среда неагрессивна по отношению к бетону, но агрессивна к арматуре, то она вызывает ее коррозию. Коррозия металлической арматуры может быть химической, электрохимической или может вызываться блуждающими токами.

Первичная защита бетона от коррозии предусматривает при его изготовлении и формировании введение в состав специальных добавок (пластифицирующих, модифицирующих, активных минеральных и др.). Кроме того, ориентируясь на условия эксплуатации цементного камня, при его формировании подбирают оптимальный для данных условий минералогический состав либо используют специальные виды цемента, повышают плотность за счет снижения водоцементного отношения, строго соблюдают технологию (уплотнение, уход за бетоном).

Агрессивное действие среды может быть уменьшено путем понижения уровня грунтовых вод или отвода их от сооружений, устройством вентиляции. Повышение коррозионной стойкости поверхностного слоя конструкций достигается обработкой их поверхности торкретированием, гидрофобизацией, силикатизацией, флюатированием, карбонизацией, лакокрасочными материалами и мастиками; введением инъекций растворов в толщу конструкции с целью повышения их плотности и прочности (цементация, смолизация). Образовавшаяся защитная пленка эффективно защищает поверхность бетона не только от воздуха и влаги, но и от воздействия различных микроорганизмов. Защиту бетона от коррозии уплотняющими пропитками используют почти во всех средах (жидкой, газообразной), особенно при повышенной влажности, кроме того, применяют перед нанесением ЛКМ. Биоцидные материалы применяются для защиты бетона от воздействия различных видов грибков, плесени, бактерий, микроорганизмов. Защита бетона от коррозии оклеечными покрытиями применяется при эксплуатации бетонного камня в жидких средах, грунтах с высокой влажностью и местах частого смачивания электролитом.

Наиболее эффективна комплексная защита бетона от коррозии, т.е. как первичная, так и вторичная.

## **4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ БИТУМОВ И БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Выбор материалов для асфальтобетона и технические требования к ним обусловлены их ролью в асфальтобетоне и его назначением в дорожной одежде.

*Битумы* – основное вяжущее вещество, используемое в дорожном строительстве. Марку битума выбирают в зависимости от вида асфальтобетона, климатических условий района строительства и категории дороги.

*Минеральный порошок* в асфальтобетоне структурирует битум и образует с ним асфальтовяжущее вещество, которое во многом определяет прочность асфальтобетона, его плотность и теплоустойчивость.

*Щебень* в асфальтобетоне является активной структурообразующей составляющей, создает каркас, воспринимающий основные нагрузки в покрытии.

*Песок* повышает удобоукладываемость смеси, более плотно заполняет пространство между зернами крупного заполнителя (щебня, гравия): повышает плотность и прочность материала. В песчаных асфальтобетонах является активной структурообразующей составляющей.

*ПАВ*. Такие добавки модифицируют вяжущее, улучшают адгезию битума к поверхности минеральных заполнителей, повышают процесс смачивания битумом частиц заполнителей, в результате чего улучшается удобоукладываемость асфальтобетонных смесей, ускоряются процессы формирования структуры в асфальтобетоне.

#### **4.1. Взаимодействие минеральных наполнителей с органическим битумным связующим.**

Физическое взаимодействие битума с минеральными материалами обусловлено способностью вяжущего адсорбироваться на поверхности минеральных зерен. Образование пленки начинается с объединения битума с частицами минерального материала и заканчивается при укладке, уплотнении и остывании асфальтобетона. На прочность и долговечность асфальтобетона оказывает влияние степень обволакивания минеральных зерен битумной пленкой. При недостатке битума вследствие проникновения воды битумная пленка отслаивается и асфальтобетон разрушается. Формирование пленки битума обуславливается, прежде всего, хорошим смачиванием минерального компонента смеси битумом. Это достигается снижением вязкости битума и нагревом минеральных материалов до рабочей температуры.

Первой стадией физического и химического взаимодействия битума с поверхностью минеральных частиц является смачивание частиц битумом. Именно смачивание обеспечивает полное обволакивание частиц битумом, в результате чего формируется ориентированный слой битума и происходит физико-химическое взаимодействие его с минеральным материалом. В результате взаимодействия на поверхности минеральных частиц образуются адсорбционно-сольватные слои связанного битума. Известняковые порошки образуют более развитые слои, кварцевые – менее развитые. На поверхности зерен битумная пленка перенасыщена высокомолекулярной частью, причем асфальтенов и смол в граничных слоях больше на известняковом, а не на кварцевом материале.

Как на тонкопористых зернах кварца, так и на зернах известняка наблюдается диффузия жидких углеводородов. Наряду с адсорбционным взаимодействием, схватывающим граничный слой битума, изменяется структура битума вследствие поверхностных сил минерального наполнителя, влияние которых распространяется перпендикулярно поверхности минеральных частиц. Битум попадает в зону их действия и претерпевает структурные изменения. Высокомолекулярные соединения битума образуют цепочки, перпендикулярные к поверхности минеральных зерен. Прочность связи звеньев цепочки по мере удаления от зерна падает и на расстоянии нескольких микрометров ( $10^{-6}$  м) практически равна нулю и битум приобретает объемные свойства. В ориентированном слое битума можно выделить три зоны с характерными структурой и физико-механическими свойствами: твердообразная, структурированная и диффузная.

Твердообразная зона граничит непосредственно с поверхностью частиц минерального наполнителя и представлена в основном адсорбционным слоем. Частицы наполнителя, покрытые твердообразной пленкой, между собой не слипаются, так как пленка клеящей способностью не обладает. Толщина твердообразной зоны на минеральных частицах не превышает долей микрометра. Структурированная зона состоит из упорядоченно расположенных высокомолекулярных компонентов битума, ориентированных в направлении минеральной подложки. За структурированной зоной расположена переходная – диффузная – зона между ориентированным слоем и объемным битумом, в котором он имеет частично упорядоченное строение. Толщина зоны зависит от температуры. При повышении температуры толщина зоны уменьшается до своего минимального значения, а при понижении увеличивается. Между ориентированным слоем и объемным битумом резкого перехода не наблюдается, точно так же и внутри слоя между зонами. В зависимости от размеров и природы зерен минерального наполнителя, а также содержания в битуме асфальтенов и ПАВ, величина ориентированного слоя меняется от долей микрометра до нескольких микрометров.

При наличии химического или адсорбционного взаимодействия минеральных зерен с органическим вяжущим эффективный объем наполнителя увеличивается. Толщина адсорбционного слоя на частицах размером от 3 до 10 мкм изменяется в пределах 1,2-17,0 мкм.

Толщина ориентированного слоя возрастает с увеличением молекулярной массы и асимметрии молекул битума. Вязкость граничного слоя меняется по мере удаления от твердой поверхности не постепенно, а скачками. Изменение вязкости граничных пленок по сравнению с вязкостью жидкости в объеме связано с ориентированным расположением молекул в граничных пленках.

На свойства битума в тонких слоях большое влияние оказывает характер поверхности, на которой адсорбирован битум. На активной поверхности с уменьшением толщины битумных слоев (меньше 10 мкм) резко увеличивается когезия вследствие ориентации структурных элементов битума. В более толстых слоях битума ориентационный эффект выражен слабее. Толщина ориентированного слоя битума на минеральных зернах наполнителя зависит от температуры: при повышении температуры – уменьшается; при понижении – увеличивается, что объясняется увеличением ассоциации молекул, эквивалентной увеличению молекулярной массы.

#### **4.2. Структурные особенности и свойства асфальтобетона.**

Структура асфальтобетона определяется качеством и количеством составляющих. Она сложная, так как компоненты полидисперсны, т.е. полидисперсность предопределяет полиструктуру.

*Макроструктура*, состоящая из битума и наполнителя (минеральный порошок), играет роль связующего и соединяет в монолит мелкий и крупный наполнитель.

*Мезоструктура* асфальтобетона состоит из песка и связующего, заполняет пустоты в щебне и обеспечивает требуемую плотность материала.

*Микроструктура* - объединяет мелкий и крупный наполнитель и обеспечивает прочность материала и предопределяет структуру и текстуру асфальтобетонов.

Структурообразующая роль щебня так же, как и песка, значительно отличается от роли минерального порошка. Его основное назначение заключается в формировании пространственного каркаса, обеспечивающего прочность асфальтобетона. При незначительном содержании щебня свойства асфальтобетона определяются свойствами асфальтового раствора. Зерна щебня в этом случае разделены толстыми прослойками раствора и являются в этом случае инертным наполнителем; размер, свойства поверхности, форма зерен щебня не оказывают при этом существенного влияния на свойства асфальтобетона. Иногда введение 10-20 % щебня может даже привести к снижению прочности асфальтобетона за счет

снижения однородности системы. Дальнейший рост содержания щебня приводит к возникновению контактов между зернами через тонкие пленки ориентированного битума. Прочность битумных слоев настолько велика, что битум под нагрузкой практически не вытесняется. При увеличении нагрузки (уплотнения) возможно разрушение зерен в зонах контакта от сосредоточенных напряжений. При этом разрушается и битумная пленка, возникают прямые контакты по минеральным зернам, что приводит к образованию конденсационных связей. Порог формирования конденсационных связей в асфальтобетоне наступает при содержании щебня более 45 %. При увеличении количества щебня до 60-65% в асфальтобетоне формируется пространственный каркас. Крупные минеральные зерна контактируют друг с другом непосредственно или через настолько тонкие прослойки битум, что вяжущее в них приобретает свойства твердого тела. Межзерновые пустоты минерального каркаса заполнены асфальтовым раствором. Это поровая структура асфальтобетона. Дальнейшее увеличение количества щебня приводит к формированию контактной структуры, в которой объем пустот в щебеночном каркасе значительно превышает объем асфальтового раствора, создает материал с большой пористостью и пониженной прочностью и плотностью.

Получение асфальтобетона с заданной структурой и свойствами достигается путем установления массовых соотношений между микро-, мезо- и макроструктурой и выдерживания этих соотношений при производстве смесей. Необходимо помнить, что данной макроструктуре соответствуют только определенные мезо- и микроструктуры.

Таблица 3 – Виды структур асфальтобетона

Макро-	Мезо-	Микро-
Базальная, щебня меньше 35%	Контактно-поровая, песка больше 40%	Поровая, минерального порошка больше 15%
Базально-поровая, щебня 35-50%	Поровая и базально-поровая, песка 30-40%	Поровая базальная минерального порошка 10-15%
Поровая, щебня 50-65%	Базальная, песка меньше 30%	Базальная, минерального порошка меньше 10%
Контактная, щебня больше 65%	Базальная, песка -0	Базальная, минерального порошка -0

Наиболее высокие показатели прочности у асфальтобетона с базальной макроструктурой (щебня меньше 35%) достигаются при контактно-поровой мезоструктуре (песка больше 40%) и поровой микроструктуре (минерального порошка больше 15%). Наилучшие показатели асфальтобетона с поровой макроструктурой (щебня 50-60%) достигаются при порово-базальной мезоструктуре (песка 30-40%) и базальной микроструктуре (минерального порошка около 10%), а с контактной макроструктурой (щебня 65%) – при базальной мезоструктуре (песка 30%) и базальной микроструктуре (минерального порошка 5%). Отношение битума к минеральному порошку в асфальтобетоне с базальной макроструктурой должно быть в пределах 0,5-0,6, с базально-поровой 0,6-0,9, с поровой и порово-контактной 0,9-1,1.

Технология асфальтобетона – совокупность методов подготовки щебня, песка, минерального порошка и битума, их смешения, укладки и уплотнения до заданной плотности. Цель технологии асфальтобетона – получение материала с заданными свойствами. Поставленная цель может быть достигнута при целенаправленном структурообразовании асфальтобетона, определяемом следующими технологическими периодами:

- подготовительный – выбор и подготовка компонентов, определение их соотношения в составе смеси;

- первый – активное структурообразование, которое протекает в момент объединения битума с минеральным материалом. В асфальтобетонной смеси формируются микроструктурные связи;
- второй – сближение структурных компонентов асфальтобетонной смеси при ее укладке и уплотнении. В асфальтобетоне формируется макроструктура;
- третий – стабилизация структуры и свойств асфальтобетона в покрытии под движением транспортных средств. Этот период продолжает технологический процесс и в значительной степени определяет надежность асфальтобетонного покрытия.

Каждый период структурообразования влияет на свойства системы. Чтобы получить материал с заданными свойствами, необходимо прогнозировать поведение всей системы, управлять технологией.

Первый период технологического процесса включает подогрев материалов до заданной температуры, дозирование, смешение исходных компонентов и транспортирование смеси к месту укладки. В этот период основная задача технологии заключается в разрушении первичных конденсационных контактов между частицами, равномерном распределении всех компонентов в смеси и обволакивании минеральных зерен битумом. Нормальное протекание процесса структурообразования обуславливается, прежде всего, хорошим смачиванием битумом минерального материала. Ухудшает смачивание наличие на поверхности минерального материала воды, адсорбируемой из воздуха, водной пленки вследствие плохого просушивания минерального материала, загрязнения пылью зерен щебня. Улучшение смачивания битумом минерального материала достигается предварительной обработкой его жидкими нефтепродуктами или активацией. При транспортировании смеси происходит дальнейшее распределение битума в асфальтобетонной смеси, а при длительной перевозке возможно расслоение смеси.

Второй период охватывает укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси; происходит дальнейшее формирование микроструктурных связей и вследствие приложения нагрузки – сближение зерен до максимальной плотности. Начинают происходить структурные деформации, заключающиеся во взаимном перемещении зерен. Макрочастицы асфальтобетонной смеси переходят в более устойчивое положение равновесия с более прочной связью между ними. При сближении частиц происходят физические процессы в пленке битума, приводящие к выжиманию ее из зон повышенного напряжения. Свободный битум заполняет межзерновое пространство, на частицах остается пленка ориентированного битума, при этом коагуляционные связи в асфальтобетоне упрочняются, прочность всей системы возрастает. В асфальтобетоне с содержанием щебня более 50 % при уплотнении тяжелыми катками происходит вырождение коагуляционных контактов в конденсационные. Ориентированный слой битума не выдавливается, а продавливается с разрушением контактной зоны зерен щебня. Во избежание этого необходимо уплотнять асфальтобетонные смеси катками на пневматических шинах или вибрационными. Прочность и долговечность асфальтобетона, уплотненного до проектной плотности при сравнительно невысоких температурах, как правило, выше, чем асфальтобетона с той же плотностью, но уплотненного при высокой температуре. Это объясняется тем, что с понижением температуры увеличивается величина ориентированного слоя битума за счет уменьшения объемного битума на минеральных частицах.

Уплотняемость связана с природой минерального материала и битума. Так, уплотняемость на известняковом материале лучше, чем на материалах из песчаника. На зернах известняка пленка битума имеет более выраженное адсорбционно-диффузное строение. У поверхности минеральной частицы больше асфальтенов, на периферии больше масел, которые способствуют уплотняемости смеси. Уплотняемость асфальтобетонных смесей связана с формой зерен.

Природный окатанный песок улучшает уплотняемость смеси. Регулировать процессы уплотнения можно за счет изменения температуры асфальтобетонной смеси. С повышением температуры смеси снижается энергоемкость уплотнения. Однако если когезия битума при высокой температуре снижается, то смесь уплотняется плохо. На практике это приводит к образованию волосных трещин после прохода катка.

Третий период характеризуется дальнейшим формированием структуры асфальтобетона под движением транспортных средств. При этом происходит доуплотнение покрытия в результате увеличения вязкости битума за счет внутренних процессов и упрочнения связей на границе раздела минеральный материал – вяжущее; происходит дальнейшая стабилизация ориентированного слоя битума, а также появления новообразования в зоне контакта.

Если правильно выбраны составы смесей, выдержаны все технологические процессы, то асфальтобетон в покрытии под воздействием автомобилей упрочняется. Если же допущены отклонения от заданного режима, то в заключительный период происходит разупрочнение структуры асфальтобетона. Наиболее распространенным нарушением является недоуплотнение. Массовые разрушения асфальтобетона в начале эксплуатации связаны с малой водо- и морозостойкостью пористого (недоуплотненного) асфальтобетона.

Асфальтобетон – материал с так называемыми обратимыми структурными связями. Это означает, что при разной температуре и под действием разной нагрузки он будет проявлять разные качества.

Выделяют следующие периоды состояния асфальтобетона:

- упруго-хрупкий – минеральный остов фиксирован прослойками битума. В этом состоянии асфальтобетон наиболее близок к цементам;
- упруго-пластичный – минеральные зерна соединены прослойками битума, которые при воздействии нагрузки проявляют упругость и эластичность;
- вязко-пластичный – минеральный остов соединен полужидким битумом, который при нагрузке сразу же деформируется.

Значение имеет степень сохранения присущих асфальтобетону свойств во всех трех состояниях. Реологические процессы формирования упруго-вязко-пластичных систем неразрывно связаны с их релаксационной природой, а сама релаксация напряжений в значительной мере зависит от температуры. Особенностью работы асфальтобетона, по сравнению с цементным, является резко выраженная зависимость двух основных реологических характеристик – прочности и вязкости – от температуры.

#### **4.3. Долговечность асфальтобетона и дорожных покрытий.**

Деструкция асфальтобетона связана, прежде всего, с изменением свойств битумного вяжущего во времени. Изменяется его групповой состав в сторону увеличения тяжелых фракций (асфальтенов и смол). Процессами, вызывающими необратимые изменения химического состава и свойств битумов в асфальтобетонах, являются:

- испарение летучих компонентов, происходящее в поверхностных слоях битума незначительной толщины и зависящее от содержания летучих компонентов, вязкости битума, температуры;
- оксиполимеризация углеводородов битума, происходящая на внешней поверхности вяжущего под действием света и ультрафиолетовых лучей;
- полиоксиконденсация, происходящая под действием кислорода.

Асфальтобетон чувствителен к изменению температуры воздуха. Это является источником постоянных структурных изменений. Битум представляет собой коллоидную структуру, в которой соотношение дисперсионной среды и дисперсной фазы зависит от температуры. При одновременном воздействии циклических

механических нагрузок (воздействие колес автомобилей) изменение пластичности приводит к нарушению структуры, к потере деформационной устойчивости покрытия и разрушению материала. Характерными дефектами асфальтобетонного покрытия является появление и развитие остаточных деформаций в виде наплывов, волн, гребенок, колеи и др.

К основным характеристикам асфальтобетонных покрытий относят ровность, износостойкость, шероховатость, шум при движении, оптические свойства, чувствительность к деформациям, водонепроницаемость.

Важным моментом на стадии содержания дорожных асфальтобетонных покрытий является постоянный мониторинг за их состоянием. Продлить срок службы дорожного покрытия до капитального ремонта можно за счет применения различного рода мероприятий содержания. Кроме того, постоянно ведутся работы по созданию новых материалов и технологий. В частности, разработаны составы и технологии получения тонкослойных литых эмульсионно-минеральных смесей (сларри сил, чип сил, микроскурфейсинг и др.), бетонов на органо-гидравлических вяжущих, полимерных многокомпонентных добавок для выпуска модифицированных битумов и асфальтобетонов с заданными свойствами, асфальтобетонов с использованием вторичного сырья (регенерация). Регенерация позволяет частично решить проблему утилизации старого асфальтобетона.

*Регенерация* асфальтобетона – технология переработки старого асфальтобетонного материала, предусматривающая восстановление и улучшение его характеристик с целью повторного использования при асфальтировании, а также проведении других дорожных работ. Переработка старого асфальтобетона является ресурсосберегающей технологией, которая позволяет существенно снизить материалоемкость дорожно-ремонтных работ и работ, связанных с асфальтированием дорожных покрытий и созданием верхних слоев основания.

Регенерация старого асфальтобетонного материала может осуществляться:

- на асфальтобетонном заводе, когда переработка предварительно снятого старого асфальтобетонного материала осуществляется в стационарных или передвижных смесительных установках;
- на месте проведения работ, когда регенерация старого асфальтобетонного материала осуществляется непосредственно в процессе асфальтирования с помощью специальной дорожно-строительной техники (термопрофилировщиков, асфальтовых разогревателей, ремиксеров, ресайклеров и др.).

Основные виды регенерации старого асфальтобетона:

- *горячая регенерация* – предусматривает нагревание старого асфальтобетонного материала и смешивание с другими компонентами (новой асфальтобетонной смеси, пластификатора и т.п.);
- *холодная регенерация* — восстановление старого асфальтобетонного материала без его разогревания (как правило, с добавлением органических и/или минеральных вяжущих, каменного материала, а также добавок, улучшающих характеристики регенерированного материала).

#### **4.4. Активационные технологии дорожных битумо-минеральных материалов.**

В настоящее время установлено, что все материалы, независимо от их агрегатного состояния, находящиеся в обычных условиях в химически пассивном состоянии, могут при комплексной механической обработке мгновенно стать более энергетически активными, способными к значительным межмолекулярным взаимодействиям на границе раздела фаз. На протяжении последних 200 лет использовались следующие технологические приемы: варьирование температуры и давления, механическое и химическое диспергирование (тонкое раздробление и растворение материалов), а также химический катализ. И сравнительно недавно появились первые публикации

об искусственной активации материалов, приводящей к увеличению их прочности и долговечности за счет инициирования хемосорбционных межфазных взаимодействий между структурными компонентами.

В основу общей гипотезы активационно-технологической механики (АТМ) положена идея оптимизации условий для проявления наиболее активного состояния минеральных компонентов и вяжущего в момент их технологических контактных взаимодействий. Гипотеза опирается на следующие положения.

В нормальном (естественном) состоянии на поверхности частиц минеральных компонентов асфальтобетона молекулярные связи скомпенсированы. Вследствие этого поверхности частиц энергетически пассивны и при взаимодействии с органическим вяжущим не удается достичь значительной (хемосорбционной) прочности их связи в контактных зонах. При простом объединении минеральных компонентов (тем более из кислых горных пород) и органических вяжущих между ними возникают адгезионные связи в основном физического характера, при этом структура (например, асфальтобетона) по-прежнему остается коагуляционной, т.е. склонной к ползучести. Поскольку все материалы состоят из молекул, связи между которыми имеют электрическую природу, возможно направленное регулирование энергетической активности поверхности контактирующих материалов с помощью методов электронно-ионной технологии (ЭИТ). Энергетически воздействуя на частицы минеральных компонентов, искусственно придавая их поверхности электрический заряд того или иного знака или «раскалывая» частицы и генерируя их «радикальный» отклик, можно управлять интенсивностью молекулярного сцепления частиц друг с другом, т.е. эффективно управлять процессом структурообразования в таких сложных дисперсных системах, как асфальтобетон. Процессы, связанные с применением ЭИТ, носят физико-химический характер и составляют первую стадию направленного управления структурообразованием асфальтовых систем. Они должны предшествовать смешению активированных компонентов асфальтобетона. Вторая стадия его направленного структурообразования предусматривает оптимизацию динамического состояния дисперсных систем (по Н.Б. Урьеву) путем эффективного использования вибрационных воздействий. Это позволяет обеспечивать наиболее благоприятные условия для перемешивания активированных компонентов и создавать однородные смеси, которые после их уплотнения формируют структуру готового продукта - дорожного покрытия.

Таким образом, на основе изложенных исходных положений можно сформулировать *общую гипотезу АТМ*. Если на компоненты битумо-минеральных материалов воздействовать так, что при этом полностью реализуется их способность к активному взаимодействию на электронно-ионном уровне, можно целенаправленно регулировать процессы адгезионного взаимодействия фаз на границе их раздела. При этом открывается реальная возможность усилить адгезионные контакты поверхностей частиц минеральных материалов, имеющих кислую природу, с органическими вяжущими (вплоть до хемосорбционного уровня). Прочной адгезионной связи на границе раздела «кислого минерального материала и органического вяжущего» можно достичь при наличии между ними достаточного уровня удельных разнополярных электростатических взаимодействий.

Анализ механизмов контактных взаимодействий между компонентами КСМ позволяет определить некоторые пути активации дисперсных минеральных наполнителей для усиления их адгезии к органическому связующему. Известно, что наиболее эффективным способом активации наполнителей за счет увеличения поверхностной энергии является механохимическая обработка материала, достигаемая дроблением, измельчением и поверхностным истиранием («обдиром») твердофазных компонентов КСМ. Поскольку свежееобразованные поверхности имеют более высокие значения поверхностной энергии, то это определяет их более

высокую адгезионную активность. Повышенное энергетическое состояние вновь образуемых поверхностей измельченного минерального порошка или «ободранного» кварцевого песка объясняется образованием значительного количества ненасыщенных валентных связей. Отметим, что здесь важную роль играет эффект повышения поверхностной активности кварцевого наполнителя (порошка) или заполнителя (в случае кварцевого песка) за счет их *поверхностной аморфизации*. Кроме того, для получения прочного адгезионного взаимодействия между твердо- и жидкофазными компонентами битумо-минеральных композиционных материалов необходимо также обеспечить максимальную *смачиваемость наполнителя* (или заполнителя) жидким связующим. Наиболее простой способ ее снижения – обработка минеральных компонентов КСМ поверхностно-активными веществами.

## 5. ДОРОЖНО-КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 5.1. Основные понятия о формировании структуры дорожных композитов.

*Композиционные материалы* – это материалы, состоящие из 2-х или более разнородных веществ, обладающие свойствами, которых нет у исходных материалов. *Дорожные композиты* – это целый класс композиционных материалов, основное отличие которых состоит в сочетании 2-х и более термодинамически несовместимых вяжущих, образующих общую структуру материала. Поскольку дорожные композиционные материалы термодинамически неустойчивы, их можно характеризовать как структуры с комплексным набором связей различной прочности, деформативности, сочетающие коагуляционные, конденсационные, кристаллические связи и структуры.

Этапы формирования структуры дорожных композитов:

- коллоидное состояние (коагуляция и образование кластеров);
- кристаллизация (перколяционные мостики и узлы);
- возникновение вторичной структуры;
- взаимодействие вторичных структур, укрупнение кластеров до взаимодействия их с каменными материалами наполнителя.

Процесс разрушения композитов, как правило, начинается с зарождения и развития субмикротрещин и микротрещин вследствие разрыва молекулярных и межмолекулярных связей, т.е. механические нагрузки вызывают разрывы молекулярных связей в структуре материала. Затем формируются макротрещины и магистральные трещины, развитие которых обусловлено концентрацией напряжений в вершине трещин. Повторное приложение нагрузок увеличивает уровень накопления повреждаемости в определенный момент, их количество достигает критического и материал разрушается. Кинетика накопления повреждений зависит от температуры, уровня и времени воздействия напряжений, режима его приложения и структурных особенностей самого материала.

Анализ дорожных композитных материалов показывает, что повреждаемость может возникнуть в результате разрыва упругих связей и при достижении предельной деформации. В первом случае повреждаемость вызывается действием напряжений, которое ведет к разрыву отдельных наиболее слабых связей с последующим формированием микротрещин. Во втором - вязкопластичная деформация приводит к удалению структурных агрегатов друг от друга на расстояние, при котором теряется их взаимодействие. В реальном материале наблюдаются эти два вида повреждаемости. Процесс накопления повреждаемости проходит 3 стадии:

- идет выравнивание напряжений за счет деформации вязких связей и ориентация кластеров вторичной структуры в направлении механических воздействий и параллельно – разрушение слабых связей, но процессы упрочнения

еще преобладают над процессами разрушения и прочность материала незначительно увеличивается;

- завершается агрегация кластеров вторичной структуры в направлении воздействия, и процесс разрушения преобладает;

- идет интенсивное разрушение структуры, что характеризуется формированием магистральных трещин и резким падением прочности.

### **5.2. Асфальтоцементные композиции.**

Асфальтоцементные композиты готовят по трем видам технологий; горячей, теплой и холодной. Широкое применение нашли АЦК, получаемые способом раздельного бетонирования, когда по слою уплотненного щебня распределяют цементно-песчаный раствор (метод «бетохальт») или специальный цемента – полимерный раствор (метод сольвации), т.е. с помощью виброуплотнения заполняют растворами пустоты черного щебня. Возможна пропитка каркасов из щебня различными полимерными и минеральными составами. В ряде стран такой метод применяют достаточно широко (Германии, Франции) К асфальтобетонам, получаемым способом раздельного смешения относят цементобетоны с добавками щебня, обработанными цементным раствором частицами регенерированного асфальтобетона, а также гранулированные грунты.

### **5.3. Теория перколяции.**

Обычно начало теории перколяции связывают с публикацией в 1957 г. работы Д.Бродбента и Дж.Хаммерсли. Авторы ввели в обиход название «теория перколяции» и рассмотрели процесс с математической точки зрения. Термин перколяция использовался для противопоставления диффузии: если в случае диффузии мы имеем дело со случайным блужданием частицы в регулярной среде, то в случае перколяции речь идет о регулярном движении (например, течении жидкости или тока) в случайной среде. Перколяция является удобной моделью для описания широкого класса явлений, которые принято называть критическими. Большинство результатов теории перколяции получено в результате компьютерного моделирования. Перколяционные процессы могут приводить к самоорганизации и образованию структур; объекты, которые образуются при перколяции, являются *фракталами*. Цепочка связанных объектов, называется в теории перколяции *кластер*. Наиболее распространенными задачами теории перколяции являются решеточные задачи: *задача узлов* и *задача связей*.

Теория перколяции объясняет возникновение вторичной структуры и роли пороговой концентрации при зарождении вторичной структуры и завершении ее формирования. В применении к строительным композиционным материалам теория была адаптирована Б.С. Радовским, который на примере образования перколяционных мостиков определил структуру композиционных материалов, т.е. образование вторичной структуры, которая проходит типичную задачу образования «узлов». Согласно Б.С. Радовскому, образование перколяционного каркаса происходит при определенном содержании кластеров, более 0,17 (17%). Они еще редки и упрочнение структуры незначительно. Заметное влияние кластеров появляется при объемном их содержании 0,33 (33%), и влияние вторичной структуры на свойства будет проявляться при объемном содержании кластеров не менее 33% от основного вяжущего. При содержании 0,67 (67%) происходит образование сплошной сетки – решетки вторичной структуры. Материал приобретает свойства вторичного вяжущего, и дальнейшее увеличение содержания кластеров уже не будет сказываться на его свойствах. Агрегаты вторичной структуры при содержании менее 60-70% располагаются в межзерновом пространстве и взаимодействуют с каменными частицами через пленки органического вяжущего.

Взаимное расположение вяжущих относительно каменного материала будет определяться их активностью, которая неодинакова, так как эти вещества по своей природе термодинамически несовместимы и не образуют истинных растворов.

Согласно правилу П.А. Ребиндера, на поверхности твердого тела будет адсорбироваться жидкость, которая своим присутствием уравнивает разность полярностей фаз между телом и оставшейся жидкостью. Если активность, определяемая диэлектрической проницаемостью, вторичного вяжущего окажется больше активности битума, но меньше, чем для каменного материала, то с каменным материалом будет взаимодействовать оно, а битум будет располагаться в межзерновом пространстве. Вторичная структура не взаимодействует с каменным материалом непосредственно и не образует сплошных «мостиков» между частицами, что объясняет разрушение образцов асфальтобетона, приготовленного на битумно-цементной композиции. Несмотря на разрушение экстрагированных образцов с содержанием вторичных структур 60-70%, они образуют кластеры, и это сказывается на гранулометрическом составе и прочности материала в конечном итоге. При малом содержании цемента изменяется количество мелких фракций. Это объясняется появлением кластеров, т.е. вторичные структуры в составе ДКМ, образованные термодинамически несовместимыми вяжущими, действуют по типу наполнителей. Но это особый наполнитель, который образован кластерами, связанными кристаллизационными и конденсационными связями, имеющими высокую прочность. Кристаллические агрегаты способны создать пространственный каркас, состоящий из более мелких агрегатов, обладающий свойствами твердообразных структур. Эти кристаллические образования взаимодействуют через высокоструктурированные прослойки органического вяжущего, приводят к резкому повышению жесткости межзернового пространства. Поэтому после появления перколяционного каркаса, когда кластеры взаимодействуют друг с другом, прочность ДКМ значительно выше, чем асфальтобетонов. Вторичные структуры обладают кольматирующим эффектом. Значительно повышается плотность бетона в 3-4 раза, при этом улучшаются такие технологические свойства, как подвижность (повышается) и удобоукладываемость. Добавка термодинамически неустойчивых, несовместимых продуктов действует в структуре ДКМ по механизму кольматирующего и армирующего наполнителя.

#### **5.4. Применение бетонов на органо-гидравлических вяжущих.**

В зависимости от состава и способа приготовления смеси на ОГВ делятся на четыре группы:

1 – смеси, состоящие из щебня (гравия), песка, гидравлического вяжущего, битума нефтяного дорожного и воды. Смеси 1-й группы могут также содержать определенное количество минерального порошка (до 50 % от массы цемента);

2 – смеси, состоящие из щебня (гравия, цементогранулята), песка, гидравлического вяжущего и битумной эмульсии;

3 – смеси, состоящие из дробленого асфальтобетона (в дальнейшем – асфальтогранулят АГ), битумной эмульсии, гидравлического вяжущего. Смеси 3-й группы могут содержать также определенное (до 20 %) количество щебня (гравия, цементогранулята) и песка из отсева дробления.

4 – смеси, состоящие из асфальтогранулята, битумной эмульсии, гидравлического вяжущего. Смеси 4-й группы могут содержать также определенное (до 50%) количество щебня (гравия, цементогранулята) и песка (природного или из отсева дробления).

Смеси 1, 2 и 3-й групп приготавливаются в смесительных установках, смеси 4-й группы приготавливаются смешением на дороге, в том числе при производстве работ по холодной регенерации асфальтобетонных дорожных одежд на месте.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что независимо от технологии приготовления бетона (даже при подаче воды после обработки минерального материала битумом) возникают условия для гидратации гидравлического вяжущего, связанные с наличием агрегатов цемента очень малых размеров, покрытых пленкой органического вяжущего пониженной толщины и прочности. При попадании в смесь воды и механическом воздействии происходит отрыв частиц битума от агрегатов цемента (поверхностная энергия воды выше, чем битума). Взаимодействие частиц цемента с водой приводит к возникновению щелочной среды и дальнейшему эмульгированию органического вяжущего, что способствует углублению процесса гидратации. Подобный процесс можно усилить методами электронно-ионных технологий, (ультразвуковое воздействие, электрогидравлический эффект и т. д.). Экспериментальные исследования рН смесей, кинетики сорбции паров воды, прочности систем «цемент-битум-вода» различного состава, рентгеноструктурный и термографический анализы подтвердили наличие процессов гидратации при приготовлении бетонов на ОГВ. Степень гидратации цемента в структуре бетона на ОГВ достигает 50-100 % по сравнению со степенью гидратации цементного камня. Меньшая степень гидратации наблюдается при подаче воды после битума. Максимальная – при применении эмульсий, раздельном приготовлении асфальтовой и цементной.

Процесс структурообразования бетонов на ОГВ заключается в появлении различного рода связей прогидратировавших агрегатов гидравлического вяжущего между собой при наличии пленок органического вяжущего различной толщины. В ряде случаев возможно появление фазовых контактов между прогидратировавшими агрегатами цемента, вызванных взаимодействием продуктов гидратации. Эти контакты возникают в разрывах битумных пленок, а также и через битумные пленки небольшой толщины. Причинами их появления при наличии углеводородных пленок являются: вугрикристаллическое давление, перенос ионов вследствие диффузии, разрыв углеводородных пленок в результате контракции, частичная взаимная растворимость составляющих. Экспериментальные исследования прочности образцов после экстрагирования битума, анализ прочности ненарушенной и разрушенной структур подтвердили возможность появления фазовых контактов. Однако учитывая незначительную прочность фазовых контактов при наличии пленок органического вяжущего, они не являются главным структурообразующим фактором бетонов на ОГВ. Основным структурообразующим элементом бетонов на ОГВ является формирование межфазных переходных слоев кластерного типа. Поскольку гидравлические и органические вяжущие являются термодинамически несовместимыми и не могут образовать устойчивой однофазной системы, граница раздела фаз является размытой и контакты осуществляются через межфазные переходные слои. На формирование межфазных слоев оказывают влияние как физические (прораствание кристаллов, адсорбция, разрушение ассоциатов битума, перенос ионов, образование двойных электронных слоев), так и химические процессы. Экспериментально подтвердить наличие переходных слоев кластерного типа можно методами фотоэлектронной спектроскопии.

Бетоны на ОГВ сочетают свойства коагуляционных, конденсационных и кристаллизационных структур (по академику Ребиндеру П. А.). Структуру подобных материалов можно представить в виде феноменологической модели с комплексным набором упругих и вязкопластических связей, чередующихся по последовательной и параллельной схемам. В результате теоретических и экспериментальных исследований были установлены следующие принципиальные положения:

1. Степень неоднородности цементной фазы (степень перемешивания) влияет на прочностные и деформационные свойства. Чем выше неоднородность, тем ниже прочность. В то же время «степень перемешивания» и прочность цементной фазы обратно пропорционально влияют на скорость разрушения композита. Увеличивая

неоднородность цементной фазы и снижая ее прочность, можно добиться заметного эффекта по улучшению трещиностойкости материала.

2. В целом для сохранения надежности материала с точки зрения трещиностойкости и сохранения высокой однородности не следует создавать материалы со сплошным кристаллизационным каркасом высокой прочности. Цементная фаза должна выполнять роль дискретно-упрочняющей и дискретно-армирующей системы.

Асфальтоцементный композит во всех случаях имеет более высокую прочность, чем асфальтобетон того же состава. Аналогично прочности изменяется и модуль упругости бетонов на ОГВ. По сравнению с традиционным асфальтобетоном модуль увеличивается с ростом количества цемента и снижением вязкости вяжущего. В то же время эффект от ввода цемента в значительно большей степени проявляется на прочности, чем модуле упругости. Такое положение является очень важным преимуществом бетонов на ОГВ с точки зрения работы в дорожной одежде, поскольку наблюдается снижение соотношения напряжения и прочности, что увеличивает надежность и долговечность.

Характерно, что минеральное вяжущее способствует росту прочности при низких температурах и ударных нагрузках. Связано это с тем, что имеющиеся кластеры гидравлических вяжущих способствуют ветвлению и гашению хрупких трещин и более интенсивному рассеиванию энергии, что положительно проявляется на ударной прочности. Играет роль также и снижение внутрискруктурных температурных напряжений за счет ввода минеральных вяжущих. Снижение однородности (степени перемешивания) ведет к падению прочности в упругой стадии, поэтому технология получения бетона играет очень большую роль.

Направленно регулировать прочностные и деформационные свойства бетонов на ОГВ можно путем изменения их микро- и макроструктуры. При этом наиболее интересным с практической точки зрения является метод регулирования микроструктуры путем ввода, наряду с минеральным вяжущим, тонкодисперсных наполнителей. Микроструктура бетона на комбинированном наполнителе специфична только для бетонов на ОГВ. Связано это, прежде всего, с кластерным строением межфазных переходных слоев и существенным влиянием внутрикристаллизационного давления на битумные пленки в процессе структурообразования бетона.

Долговечность бетонов на ОГВ при действии статической нагрузки определяется их составом и степенью развития кристаллизационной структуры. Изменение свойств бетонов на ОГВ во времени и процессы старения отличаются от процессов в асфальтобетоне. Асфальтобетон подвержен постоянной деструкции, причем наиболее интенсивно — в начальный период. Бетоны на ОГВ с низкой степенью гидратации вначале имеют степень деструкции аналогичную асфальтобетону, затем упорядоченность структуры резко возрастает. Предварительно загидратированный цемент способствует увеличению степени «кристалличности» на начальном этапе, затем начинает медленно развиваться деструкция. Причем степень ее развития в несколько раз ниже, чем у асфальтобетонов. В целом высокая морозостойкость и низкая степень деструкции под действием погодноклиматических факторов подтверждает хороший уровень «взаимодействия» органических и гидравлических вяжущих в структуре бетонов на ОГВ. Связано это, прежде всего, с наличием переходных слоев кластерного типа с определенной энергией химической связи.

В перспективе для приготовления бетонов на ОГВ могут оказаться эффективными методы электронно-ионной технологии, разработанные Я.Н. Ковалевым. Данные методы позволяют в комплексе изменять как структуру вяжущих, так и снижать затраты энергии на приготовление смесей.

## 6. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДОРОЖНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

На сегодняшний день существует множество путей исследований непосредственно самих материалов и изделий, конструкций, которые позволяют получить точные данные о процессах формирования структуры и образования новых химических соединений, изучаемых на микро- и молекулярно-ионном уровнях.

Петрографический метод. Этот метод используется в основном для исследований неорганических материалов: различных горных пород, минералов, цемента, цементного камня, бетонов, стекла, шлаков, керамики. Исследования проводятся с помощью микроскопов различных конструкций: от обычных световых, позволяющих рассмотреть структуры с расстоянием между элементами до 0,25 мкм, до электронных - порядка 0,01...0,10 нм.

Электронная микроскопия. Этот метод применяется для исследования тонких структур. Современные электронные микроскопы имеют полезное увеличение до  $10^6$  раз. Такое глубокое проникновение в мир малых частиц стало возможным благодаря использованию в микроскопии электронных лучей, длина волны которых во много раз меньше, чем у видимого света. Электронный микроскоп позволяет изучить размеры и форму отдельных кристаллов, процессы диффузии, фазовые превращения при тепловой обработке и охлаждении материалов, механизмы деформации и разрушения субмикроскопических структур материалов. В настоящее время используются растровые РЭМ (сканирующие) и магнитно-просвечивающие электронные (ПЭМ) микроскопы.

Метод инфракрасной спектроскопии. Метод состоит в получении и исследовании спектров в ИК-области излучения. Изучают колебательные и вращательные спектры молекул и определяют по ним химический состав и структуру веществ, например, исследуют структурные изменения битумов и их эмульсий. Инфракрасная техника позволяет измерять температуру нагретых тел на расстоянии, что может использоваться в качестве датчиков температуры в технологических процессах получения строительных материалов и контроля за их качеством.

Рентгенографический (рентгеноструктурный, рентгенофазовый) анализ. Это метод исследования структуры и состава вещества путем экспериментального изучения дифракции рентгеновских лучей в этом веществе.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) используется для определения минерально-фазового состава строительных материалов. Основа метода состоит в том, что о фазовых превращениях, происходящих в материале, можно судить по сопровождающим эти превращения тепловым эффектам. Прибор для проведения ДТА называется *дериватографом*.

Колориметрические методы. Эти методы основаны на изменении светопоглощения растворами окрашенных соединений. Светопоглощение в исследуемой жидкости сравнивается с поглощением в эталонной (с известным содержанием компонента), после чего по соотношениям, известным как закон Бугера-Ламберта-Бера, рассчитывается концентрация с точностью  $10^{-3}$ ... $10^{-8}$  моль/л (в зависимости от рода анализируемого вещества). Цвет растворов определяется с помощью специальных приборов - *фотоэлектроколориметров*.

Оптические методы. Люминесцентный анализ. Люминесценция – свечение некоторых веществ, более высокое по сравнению с их тепловым излучением при данной температуре и возбужденное каким-либо источником энергии (возникает под действием света, радиоактивного и рентгеновского излучений, электрического поля, при химических реакциях и механических воздействиях).

Спектральный анализ. В его основу входит: анализ испускания молекул и атомов твердого тела, их поглощение и используется неограниченный диапазон длин волн от рентгеновских до радиоволн.

Магнитоспектроскопические методы. К этим методам относятся ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).

Принципы ЯМР и ЭПР одинаковы. В методе ЯМР используется свойство ядер атомов ориентироваться в магнитном поле как малые магниты. Метод ЭПР связан с магнитным резонансом неспаренных электронов.

Сорбционные методы. Методы основаны на явлениях адсорбции – самопроизвольном повышении концентрации вещества на поверхности раздела фаз, сопровождающееся понижением межфазной энергии. Сорбционные методы позволяют определять пористость материалов, проводить разделение многокомпонентных смесей (хроматографический метод).

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Физико-химические основы технологии строительных материалов: учеб.-метод. пособие / Я.Н. Ковалев. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2017. – 285 с.
2. Дорожно-строительные материалы и изделия: учеб.-метод. пособие / Я.Н. Ковалев, С.Е. Кравченко, В.К. Шумчик. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2013. – 630 с.
3. Веренько В.А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства. – Мн.: Наука и техника, 1993. – 246 с.
4. Вернигорова В.Н., Макридин Н.И., Соколова Ю.А. Современные методы исследования свойств строительных материалов. – М.: Издательство АСВ, 2003 – 136 с.
5. Кучма М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.
6. Ковалев Я.Н. Активационные технологии дорожно-композиционных материалов. – Минск: БелЭн, 2002. – 336 с.
7. Опанасенко О.Н. Свойства и применение битумных дисперсий и битумно-эмульсионных материалов / О.Н. Опанасенко, Н.П. Крутько; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т общей и неорг. химии. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 270 с.
8. Добрунова В.М. Физико-химические основы технологии дорожных строительных материалов. Краткий курс лекций. /УО «Брестский государственный технический университет». – Брест, 2005 – 35с.
9. Технология бетона. Учебник. Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 528 с.

Учебное издание

Составитель: Шалобыта Татьяна Петровна.

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Краткий конспект лекций для студентов специальности  
*1-70 03 01 Автомобильные дороги*

Ответственный за выпуск: Шалобыта Т.П.

Редактор:

Технический редактор:

Издательство БрГТУ

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №  
Подписано к печати 2022. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Гарнитура Arial.

Усл. п. л. 2,1. Уч. изд. л.2,25 Тираж экз. Заказ №

Отпечатано на ризографе Уреждения образования «Брестский  
государственный технический университет».

224017, Брест, ул. Московская, 267.

[Вернуться в оглавление](#)

## **2 Раздел контроля знаний**

**Примерный перечень вопросов, выносимых на зачет по дисциплине  
«Физико-химические основы технологии строительных материалов»  
для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине  
Физико-химические основы технологии строительных материалов

1. Дорожно-строительные материалы, их характеристика и значение.
2. Основные физико-химические свойства и показатели.
3. Механические свойства дорожно-строительных материалов.
4. Конструктивные свойства дорожных и строительных материалов.
5. Технологические и эксплуатационные свойства дорожных и строительных материалов.
6. Дисперсные системы. Классификация.
7. Основные свойства дисперсных систем.
8. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.
9. Физико-химическая механика в дисперсных системах.
10. Поверхностная энергия, поверхностное натяжение.
11. Удельная поверхность и методы определения удельной поверхности.
12. Смачиваемость и мера смачиваемости.
13. Адгезия, роль в технологии получения дорожно-строительных материалов.
14. Когезия.
15. Основы реологии дорожно-строительных материалов.
16. Явления адсорбции. Общие понятия и виды, методы исследования.
17. Что такое поверхностно-активные вещества, что представляют собой их молекулы?
18. ПАВ в дорожном материаловедении.
19. Какие науки составляют основу физикохимии бетона?
20. Какие направления различают в теории бетона в настоящее время? В чем заключается практическое значение теории бетона?
21. Какие ученые внесли существенный вклад в развитие общетеоретических основ технологии бетона?
22. Какие основные химические соединения включает цемент?
23. Структура дорожного бетона. Общие понятия, виды и методы исследования.
24. Характеристика химических связей в дорожных бетонах на уровне ультрамикроскопии.
25. Характеристика химических связей дорожного бетона на уровне микроструктуры.
26. Характеристика химических связей дорожного бетона на уровне макроструктуры.
27. Какова роль оксидов  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в образовании основных компонентов цементного клинкера?
28. Назовите три формы существования воды. Чем объясняется аномальная особенность воды растворять различные вещества, обладающие ионной связью?
29. Что такое двойной электрический слой? Как он возникает и каково его строение?
30. В чем заключается процесс контракции объема системы «цемент - вода»?
31. Как с помощью химических добавок можно регулировать структурную вязкость бетонной смеси?
32. Разрушение бетона под действием химических и биологических факторов. Виды коррозии и меры защиты.
33. Композиционные материалы. Классификация и характеристики.
34. Каким главным фактором определяется прочность и долговечность искусственных композиционных строительных материалов?
35. Основные понятия о формировании структуры дорожно-композиционных материалов.

36. Асфальтоцементные композиции. Классификация.
37. Кинетика накопления повреждаемости в дорожно-композиционных материалах.
38. Общая рабочая теория активизационно - технологической механики битумно-минеральных материалов (теория перколяции).
39. Современные представления о структуре бетонов на ОГВ.
40. Свойства органоминеральных смесей на наполнителях из портландцемента.
41. Современные технологии получения асфальтоцементного композита. Способ раздельного смешения.
42. Асфальтобетоны. Общая характеристика и структура.
43. Каковы требования к исходным материалам для асфальтобетона?
44. Физико-химические методы модификации битумов и дорожных материалов на его основе.
45. Распределение битума в асфальтобетоне и его взаимодействие с минеральными частицами.
46. Испытание минерального компонента.
47. Проектирование составов асфальтобетона.
48. Основные этапы структурообразования асфальтобетона.
49. Структурные особенности асфальтобетона.
50. Перечислите важнейшие физико-механические свойства асфальтобетона.
51. Свойства асфальтобетонов: прочность, деформативность, реология.
52. Общие основы технологии асфальтобетона. Периоды технологического процесса.
53. Структурно-механические особенности технологии тяжелого асфальтобетона.
54. Общие предпосылки использования местных кремнеземистых материалов и вторичных отходов.
55. Методы определения смачиваемости твердой поверхности, перегонки и экстракции битума, эмульсии.
56. Релаксация и устойчивость асфальтобетонов к атмосферным воздействиям.
57. Характеристики асфальтобетонного покрытия.
58. Технические требования и контроль качества асфальтобетона.
59. Регенерация асфальтобетонов. Пути энергосбережения.
60. Схемы контроля качества продукции.
61. Испытание дорожно-строительных материалов. Испытание физико-механических свойств дорожного цементобетона и асфальтобетона.
62. Петрографический метод.
63. Методы дифференциально-термического анализа, рентгенографии.
64. Микроскопические методы исследования дорожно-строительных материалов.
65. Колориметрия, люминисцентный метод исследования дорожных покрытий.
66. Магнитоспектроскопические методы.
67. Сорбционные методы.

[Вернуться в оглавление](#)

**3 Вспомогательный раздел**  
**Учебная программа по дисциплине**  
**«Физико-химические основы технологии строительных материалов»**  
**для студентов специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги**

**Р-1** 2021

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор  
\_\_\_\_\_  
М.В.Нерода  
28.12 2021  
Регистрационный № УД-21-2-022/уч.

Физико-химические основы технологии строительных материалов  
Учебная программа учреждения высшего образования по учебной  
дисциплине для специальности  
1 – 70 03 01 Автомобильные дороги  
для направления специальности  
1-70 03 01 01 01 Строительство дорог и аэродромов

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта специальности ОСВО 1-70 03 01-2013 Автомобильные дороги и учебного плана специальности 1-70 03 01 Автомобильные дороги, регистрационный № J70-1-004/ тип., утверждённого 28.06.13.

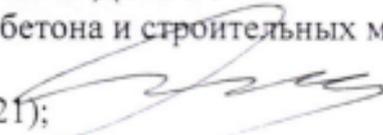
**СОСТАВИТЕЛЬ:**

Шалобыта Т.П., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, кандидат технических наук

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

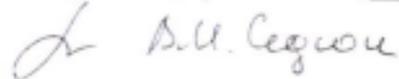
Сырица Г.В., директор РУП «Сервис» РУП «Белстройцентр»  
Шведовский П.В., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций, кандидат технических наук, профессор

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой технологии бетона и строительных материалов  
Заведующий кафедрой  В.В.Тур  
(протокол № 5 от 14.12. 2021);

Методической комиссией строительного факультета  
Председатель методической комиссии  В.И.Юськович  
(протокол № 04 от 28.12. 2021);

Научно-методическим советом БрГТУ (протокол № 3 от 28.12. 2021)

Методическим советом 

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Место учебной дисциплины.

Освоение дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» базируется на компетенциях, приобретенных ранее студентами при изучении курсов физики, химии, дорожно-строительных материалов и изделий и др.

Цель преподавания учебной дисциплины: формирование научных знаний в области современных строительных материалов и изделий, технологии их получения и свойствах, а также практических навыков их рационального использования в дорожном строительстве. Получение и правильная эксплуатация дорожных и строительных материалов невозможна без знания физико-химических основ строения и свойств дисперсных систем, процессов твердения и формирования различных структур.

Задачи учебной дисциплины:

– приобретение знаний физико-химических основ технологии строительных материалов: физико-химической механики дисперсных систем, теоретического и прикладного бетоноведения, теории композитов, методов активации битумоминеральных материалов;

– формирование навыков творческого применения базовых знаний для развития прогрессивных технологий строительного материаловедения; работы с нормативной и справочной литературой;

– овладение методами сбора и систематизации информационных и исходных данных; оценки технологической эффективности оборудования, способности принимать решения по оптимизации процессов.

В результате изучения учебной дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» формируются следующие компетенции:

- академические: уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач, владеть исследовательскими навыками;

- профессиональные: обоснованно выбирать эффективные дорожно-строительные материалы, иметь комплексное представление о физико-химических основах отдельных технологических операций и технологического процесса в целом при производстве дорожных и строительных материалов;

- АК-1-4,7,8; СЛК-2-4; ПК-1,2,17,19-24,40,42,47.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

знать:

– физическую сущность явлений, происходящих в материалах в условиях производства и эксплуатации, их взаимосвязь со свойствами;

– основные свойства современных строительных материалов;

– теоретические и технологические основы производства строительных материалов;

– принципы создания эффективных технологических процессов при изготовлении строительных материалов;

уметь:

– оценивать поведение материалов при воздействии различных эксплуатационных факторов;

– в результате анализа условий эксплуатации правильно выбирать материал, назначить его технологическую подготовку в целях получения заданной структуры и свойств;

– ориентироваться в технологии получения различных типов строительных материалов;

владеть:

– методами определения физико-химических свойств строительных материалов;

– принципами оптимизации материалов, повышения срока службы строительных материалов и изделий на этапах изготовления и эксплуатации.

Знания и умения, полученные студентами в процессе изучения дисциплины «Физико-химические основы технологии строительных материалов» базируются на изучении разделов такой дисциплины, как:

«Физика», «Химия» (Дисперсные системы. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем.);

«Дорожно-строительные материалы и изделия» (Основные физико-механические свойства строительных материалов. Неорганические вяжущие. Бетоны. Органические битумные вяжущие. Асфальтобетоны. Мастики и эмульсии. Полимерные материалы.).

**План учебной дисциплины для дневной формы получения  
высшего образования**

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Академических часов на курсовой проект (работу)	Форма текущей аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары		
1 – 70 03 01 1-70 03 01 01	Автомобильные дороги Строительство дорог и аэродромов	4	8	60	1	32	32	-	-	-	-	Зачет

## 1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1.1. ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

#### Тема 1. Введение.

Определение дисциплины и ее связь с естественно-научными и профилирующими дисциплинами учебного плана. Цели и задачи курса. Краткая история развития производства строительных материалов. Влияние физико-химических процессов на формирование структуры и основные свойства материала. Современное состояние ДСМ.

Тема 2. Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения.

Дисперсные системы: основные понятия, классификация. Основные свойства дисперсных систем. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.

Физико-химическая механика в дисперсных системах. Поверхностная энергия. Смачиваемость. Адгезия и когезия, роль в технологии получения ДСМ. Адсорбция. ПАВ.

Основы реологии.

Понятие о прочности композиционных строительных материалов.

#### Тема 3. Теоретические основы бетоноведения.

Физико-химические основы материаловедения и технологии материалов на неорганических вяжущих. Основы структурообразования, связи, механизм твердения. Явление адсорбции, основные положения теории двойного электрического слоя (ДЭС). Коррозия и защита бетона. Совершенствование технологии цементобетона.

Тема 4. Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумоминеральных материалов.

Влияние технологии получения на особенности битумных вяжущих.

Асфальтобетоны. Общая характеристика и структура. Распределение битума в асфальтобетоне. Структурные особенности свойства АБ. Характеристики асфальтобетонного покрытия. Релаксация и устойчивость АБ к атмосферным воздействиям. Регенерация АБ. Активационные технологии.

Тема 5. Дорожно-композиционные материалы.

Основные понятия о формировании структуры ДКМ. Асфальтоцементные композиции. Общая рабочая теория активационно-технологической механики битумно-минеральных композиций (теория перколяции). Применение бетонов на ОГВ.

Тема 6. Основные методы исследования и контроля качества строительных материалов и изделий.

Методы исследования и контроля качества строительных материалов (физико-механические, ДТА, рентгенография, УЗИ).

## 2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ для дневной формы получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самост. работы	Форма контроля знаний
		Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинарские занятия		
	8-й семестр	32				28	
1.	Введение	2				1	3
2.	Физико-химия дисперсных систем и теоретические основы строительного материаловедения	10				5	3
3.	Теоретические основы бетоноведения	7				6	3
4.	Физико-химические основы материаловедения и технологии битумов и битумо-минеральных материалов	7				6	3
5.	Дорожно-композиционные материалы	4				6	3
6.	Основные методы исследования и контроля качества строительных материалов и изделий	2				4	3

Обозначение: 3 - зачет.

## 4. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. Перечень литературы

#### Основная

1. Физико-химические основы технологии строительных материалов: учеб.-метод. пособие / Я.Н. Ковалев.- Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2017.-285с.

2. Дорожно-строительные материалы и изделия: учеб.-метод. пособие / Я.Н. Ковалев, С.Е. Кравченко, В.К. Шумчик.- Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2013.-630с.

#### Дополнительная

3. Кучма М.И. ПАВ в дорожном строительстве.- М.: Транспорт, 1980.

4. Ковалев Я.Н. Активационные технологии дорожно-композиционных материалов.- Минск: Б.Э. ,2002

5. Вернигорова В.Н., Макридин Н.И., Соколова Ю.А. Современные методы исследования свойств строительных материалов.- М.: Издательство АСВ, 2003.

### 4.2. Перечень методических указаний

6. Добрунова В.М. Физико-химические основы технологии дорожных строительных материалов. Краткий курс лекций. /УО «Брестский государственный технический университет».- Брест, 2005-35с.

### 4.3. Перечень вопросов к зачету

1. Дорожно-строительные материалы, их характеристика и значение.
2. Основные физико-химические свойства и показатели.
3. Механические свойства дорожно-строительных материалов.
4. Конструктивные свойства дорожных и строительных материалов.
5. Технологические и эксплуатационные свойства дорожных и строительных материалов.
6. Дисперсные системы. Классификация.
7. Основные свойства дисперсных систем.
8. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах.
9. Физико-химическая механика в дисперсных системах.
10. Поверхностная энергия, поверхностное натяжение.
11. Удельная поверхность и методы определения удельной поверхности.
12. Смачиваемость и мера смачиваемости.
13. Адгезия, роль в технологии получения дорожно-строительных материалов.
14. Когезия.
15. Основы реологии дорожно-строительных материалов.
16. Явления адсорбции. Общие понятия и виды, методы исследования.
17. Что такое поверхностно-активные вещества, что представляют собой их молекулы?
18. Какие науки составляют основу физикохимии бетона?
19. Какие направления различают в теории бетона в настоящее время? В чем заключается практическое значение теории бетона?
20. Какие ученые внесли существенный вклад в развитие общетеоретических основ технологии бетона?

21. Какие основные химические соединения включает цемент?
22. Структура дорожного бетона. Общие понятия, виды и методы исследования.
23. Характеристика химических связей в дорожных бетонах на уровне ультрамикроскопии.
24. Характеристика химических связей дорожного бетона на уровне микроструктуры.
25. Характеристика химических связей дорожного бетона на уровне макроструктуры.
26. Какова роль оксидов  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в образовании основных компонентов цементного клинкера?
27. Назовите три формы существования воды. Чем объясняется аномальная особенность воды растворять различные вещества, обладающие ионной связью?
28. Что такое двойной электрический слой? Как он возникает и каково его строение?
29. В чем заключается процесс контракции объема системы «цемент - вода»?
30. Как с помощью химических добавок можно регулировать структурную вязкость бетонной смеси?
31. Разрушение бетона под действием химических и биологических факторов. Виды коррозии и меры защиты.
32. Дорожно-композиционные материалы. Классификация и характеристики.
33. Каким главным фактором определяется прочность и долговечность искусственных композиционных строительных материалов?
34. Основные понятия о формировании структуры дорожно-композиционных материалов.
35. Асфальтоцементные композиции. Классификация.
36. Кинетика накопления повреждаемости в дорожно-композиционных материалах.
37. Общая рабочая теория активизационно - технологической механики битумно-минеральных материалов (теория перколяции).
38. Современные представления о структуре бетонов на ОГВ.
39. Свойства органоминеральных смесей на наполнителях из портландцемента.
40. Современные технологии получения асфальтоцементного композита. Способ раздельного смешения.
41. Асфальтобетоны. Общая характеристика и структура.
42. Каковы требования к исходным материалам для асфальтобетона?
43. Физико-химические методы модификации битумов и дорожных материалов на его основе.
44. Распределение битума в асфальтобетоне и его взаимодействие с минеральными частицами.
45. Испытание минерального компонента. Набухание с битумом.
46. Проектирование составов асфальтобетона. Расчет.
47. Назовите этапы структурообразования асфальтобетона.
48. Структурные особенности асфальтобетона.
49. Перечислите важнейшие физико-механические свойства асфальтобетона.

50. Свойства асфальтобетонов: прочность, деформативность, реология.
51. Общие основы технологии асфальтобетона. Периоды технологического процесса.
52. Структурно-механические особенности технологии тяжелого асфальтобетона.
53. Общие предпосылки использования местных кремнеземистых материалов и вторичных отходов.
54. Методы определения смачиваемости твердой поверхности, перегонки и экстракции битума, эмульсии.
55. ПАВ в дорожном материаловедении.
56. Релаксация и устойчивость асфальтобетонов к атмосферным воздействиям.
57. Характеристики асфальтобетонного покрытия.
58. Технические требования и контроль качества асфальтобетона.
59. Регенерация асфальтобетонов. Пути энергосбережения.
60. Схемы контроля качества продукции.
61. Испытание дорожно-строительных материалов. Испытание физико-механических свойств дорожного цементобетона и асфальтобетона.
62. Петрографический метод.
63. Методы дифференциально-термического анализа, рентгенографии.
64. Микроскопические методы исследования дорожно-строительных материалов.
65. Колориметрия, люминисцентный метод исследования дорожных покрытий.
66. Магнитоспектроскопические методы.
67. Сорбционные методы.

#### 4.5. Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы обучающихся по учебной дисциплине

1. Влияние физико-химических процессов на формирование структуры и основные свойства материала.

Рекомендуемая литература: [1, 2].

2. Основные свойства дисперсных систем. Теоретические основы структурообразования в дисперсных системах. Физико-химическая механика в дисперсных системах. Адгезия и когезия. ПАВ. Основы реологии. Понятие о прочности композиционных строительных материалов.

Рекомендуемая литература: [1-4].

3. Основы структурообразования, связи, механизм твердения. Явление адсорбции, основные положения теории двойного электрического слоя (ДЭС). Коррозия и защита бетона.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 4].

4. Асфальтобетоны. Характеристики асфальтобетонного покрытия. Релаксация и устойчивость АБ к атмосферным воздействиям. Активационные технологии.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 4].

5. Основные понятия о формировании структуры ДКМ. Асфальтоцементные композиции. Общая рабочая теория активационно-технологической механики битумно-минеральных композиций (теория перколяции).

Рекомендуемая литература: [1, 2, 4].

6. Методы исследования и контроля качества строительных материалов (физико-механические, ДТА, рентгенография, УЗИ).

Рекомендуемая литература: [1, 56].

#### 4.6. Перечень средств диагностики результатов учебной деятельности

Для диагностики результатов учебной деятельности используется письменная формы диагностики компетенций студента.

Зачет проходит в письменной форме по лекционному курсу. Для аттестации студентов на соответствии их персональных достижений поэтапным и конечным требованиям программы предлагается использовать представленные выше вопросы.

#### Критерии оценки знаний и компетенций студентов на зачете

Зачтено	<ul style="list-style-type: none"><li>– достаточно полное знание учебного материала;</li><li>– усвоение основной литературы, рекомендованной программой;</li><li>– правильно даны ответы на 60% вопросов;</li><li>– задачи решены правильно, с поясняющими рисунками или с незначительными погрешностями и неточностями.</li></ul>
Не зачтено	<ul style="list-style-type: none"><li>– пробелы в знаниях или отсутствие знаний по значительной части основного учебно-программного материала;</li><li>– некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач: отсутствие пояснительных рисунков, формул, неверный численный ответ;</li><li>– допущены существенные ошибки при ответе на вопросы задания;</li><li>– отказ от решения задачи и ответа на вопросы.</li></ul>

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
1. Дорожно-строительные материалы и изделия	кафедра технологии бетона и строительных материалов	Зав. кафедрой  В.В, Тур	протокол № _____ от _____ 2021

Содержание учебной программы  
согласовано с выпускающей кафедрой

Заведующий выпускающей кафедрой,  
кандидат технических наук,

О.Г. Санникова

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
на 20\_\_\_\_/20\_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
технологии бетона и строительных материалов  
\_\_\_\_\_ (протокол № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_)

Заведующий кафедрой,  
доктор технических наук, профессор

В.В.Тур

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета  
кандидат технических наук, доцент

С.М. Семенюк

[Вернуться в оглавление](#)