

Мировое производство бетона составляет 13 миллиардов тонн в год



Принципы устойчивого развития, проектируемые в области строительного производства – **Sustainable construction**



Принципы устойчивого развития, проектируемые в области строительного производства – **Sustainable construction**



- **Повышение долговечности материалов** (*больше время "безотходной" фазы жизненного цикла*):
- Оптимизация состава, технологии производства ...)
- Повышение качества поверхности
- Улучшение качества обслуживания
- ...



- **Утилизация отходов промышленности:**
- вторичные отходы отрасли строительства
- вторичные отходы других отраслей промышленности



- **Оптимизация существующих способов производства:**
- оптимизация технологических процессов
- Оптимизация энергопотребления
- оптимизация формы и армирования элементов – уменьшение материалоемкости
- Оптимизация технологии строительного производства

Минеральные добавки



Производство цемента

Природные
Заполнители, вода
ресурсы



Не
возобновляемые
ресурсы

Переработка

Жизненный
цикл

Использование
вторичных
ресурсов

Повторное
использование

Снос

Классификация



Проект



Свалка

Требования к бетону – продукту отрасли строительства

Качество бетона (комплекс всех характеристик продукта) обеспечивает **надежность** железобетонных конструкций. Надежность подразумевает следующее:

- *Безопасность*: обеспечивать такие условия, которые препятствуют какой-либо опасности для здоровья людей или животных и окружающей среды при эксплуатации конструкции;
- *Технологичность*: способность конструкции выполнять требуемые эксплуатационные функции в процессе эксплуатации;
- *Долговечность*: способность конструкции противостоять влиянию долговременным физических, химических и биологических внешних и внутренних воздействий.

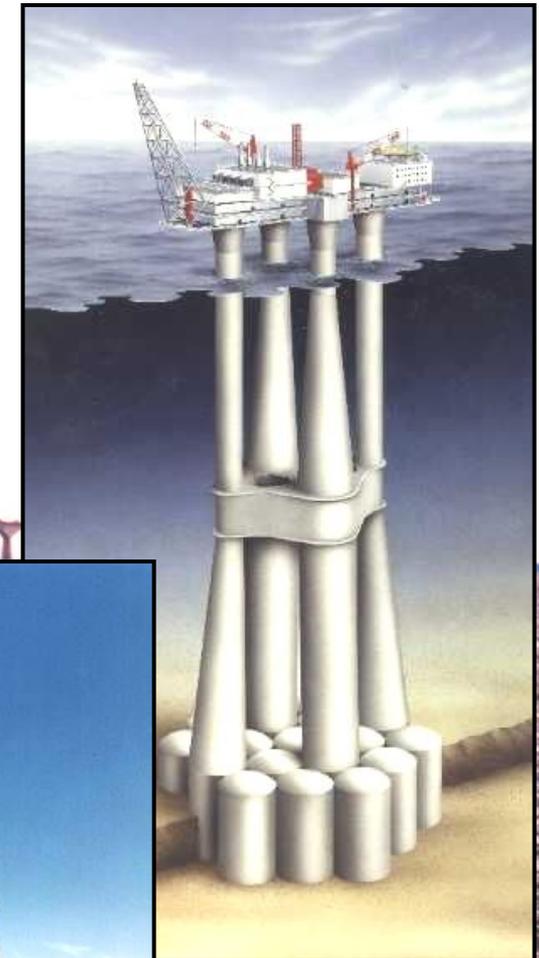
Долговечность (прочность) бетона, как строительного материала, является одним из основных условий достижения целей устойчивого развития, связанных с минимизацией отрицательного воздействия строительных конструкций на окружающую среду.

HPC?

High-Durability Concrete High-Strength Concrete

Мост Конфедерации, Нортумберлендский Пролив
(Prince Edward Island / (New Brunswick) , 1997

Нефтедобывающая платформа в Северном море,
Норвегия



High Performance Concretes (HPC) - бетоны с высокими эксплуатационными и технологическими свойствами

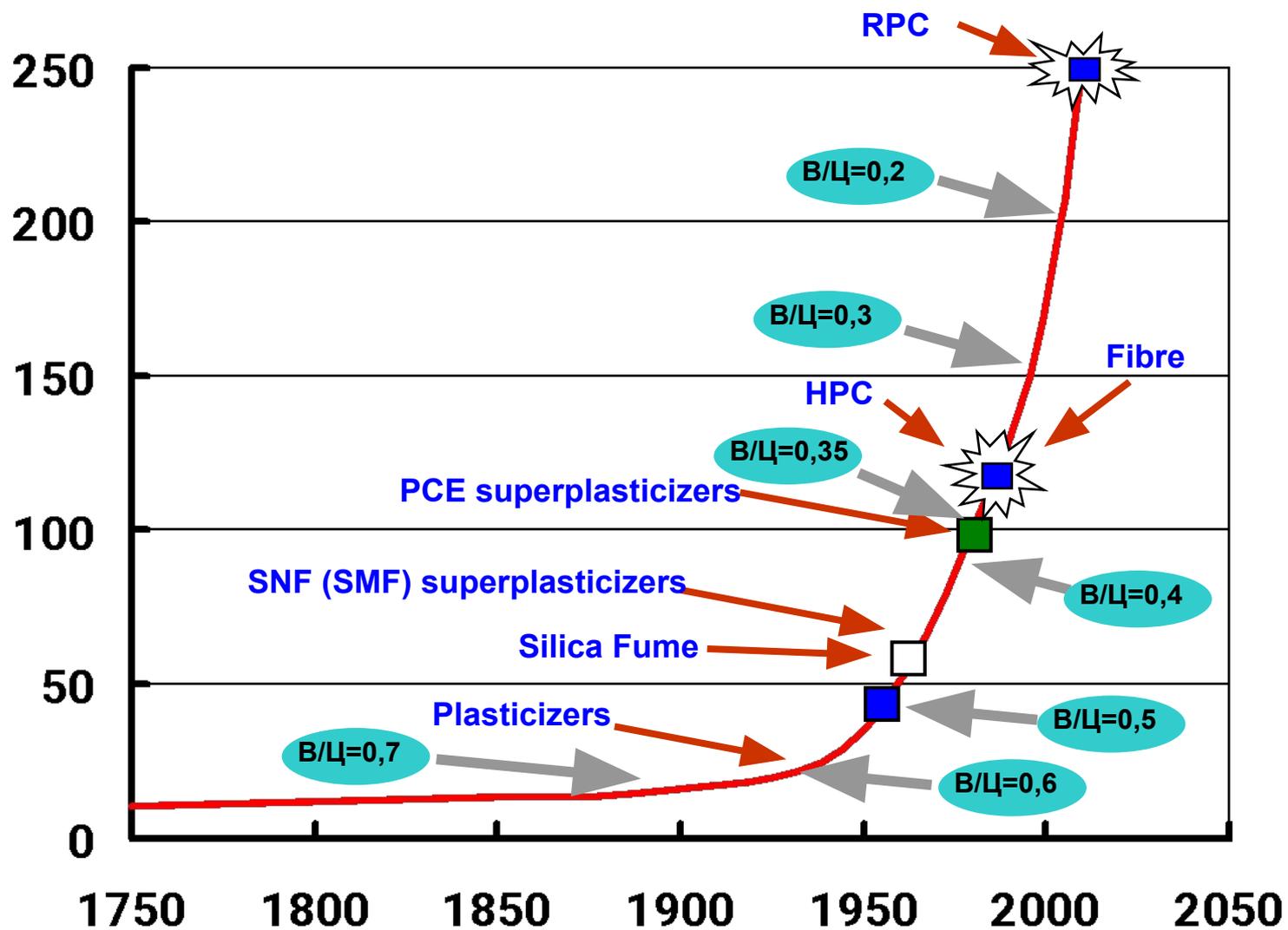
Концепция HPC

- высокие физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов – класс по прочности выше C50/60 (согласно EN 206-1), низкая проницаемость для воды (W12...W20) и газов, низкая усадка и ползучесть, повышенная коррозионная стойкость и долговечность, т.е. свойства, сочетание которых или преобладание одного из которых обеспечивает высокую надежность конструкций в зависимости от условий эксплуатации;

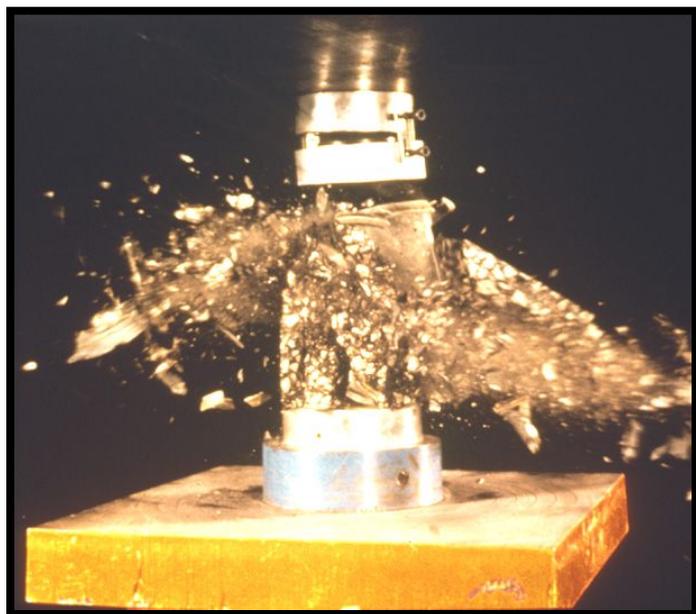
- использование существующей производственной базы, доступных материалов и ресурсосберегающих технологий производства бетонных смесей, изготовления из них бетонных и железобетонных изделий и конструкций с широким диапазоном свойств.

Развитие прочности бетона

Прочность при сжатии, МПа



High Strength Concretes (HSC) – высокопрочные бетоны

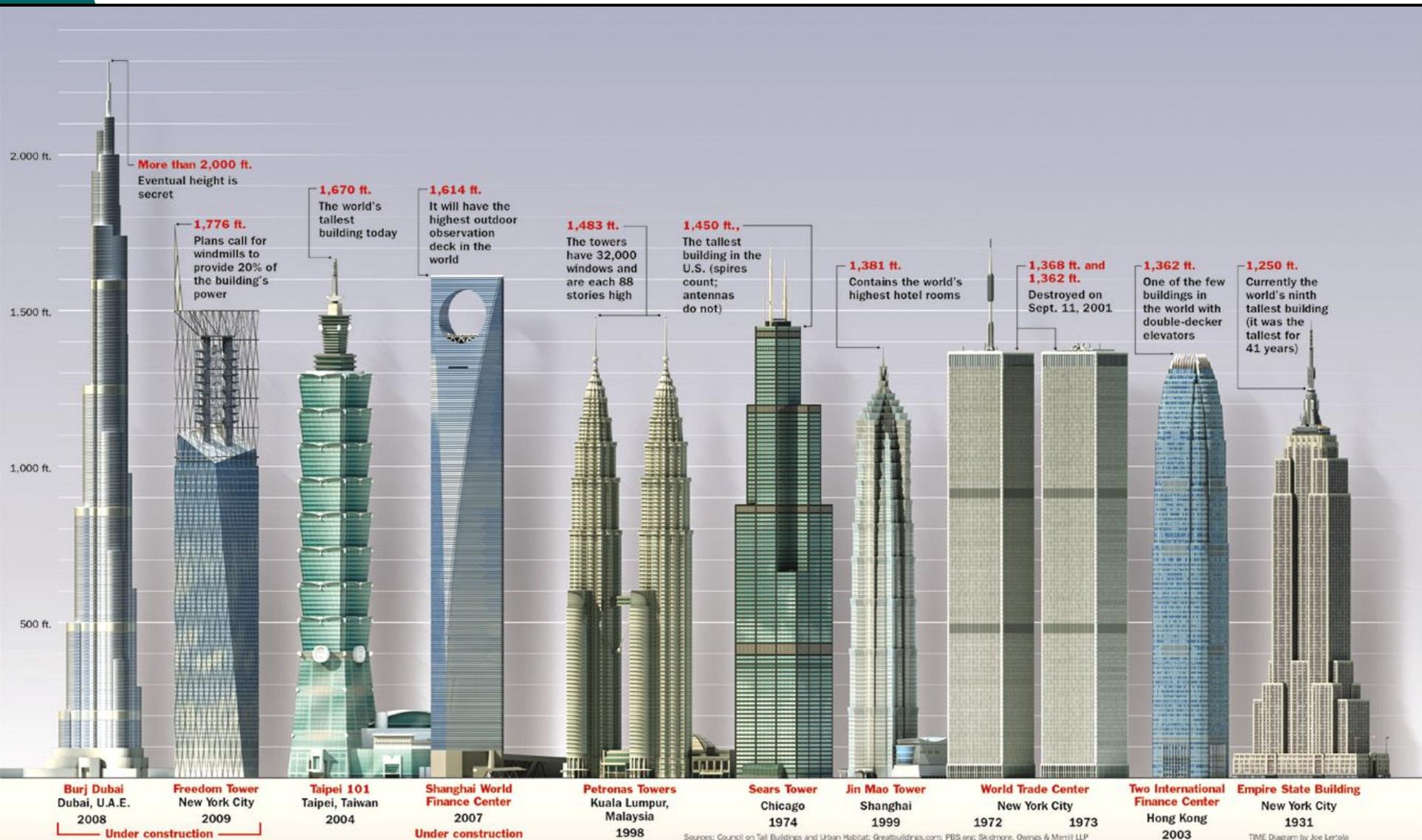


Максимальный класс бетона по прочности при сжатии:

- * Норвегия – В 105,
- * Япония, Великобритания, Россия, Украина – В 80,
- * Швеция – В 75,
- * Германия, Франция – В 65,
- * Евростандарт EN 206 "Бетоны" - В 115 (С 115)

- **90% товарного бетона:**
20 МПа - 40 МПа @ 28-d (преимущественно 30 МПа – 35 МПа);
- **High-strength concrete – высокопрочный бетона (по определению):**
≥ 70 МПа – прочность при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения

Высотное строительство



High Strength Concretes (HSC) – высокопрочные бетоны



Petronas Tower Kuala Lumpur

- высота 452 м;
- бетон C60/75-C80/95;
- $V/C=0,27$.



ММДЦ «Москва- Сити»:

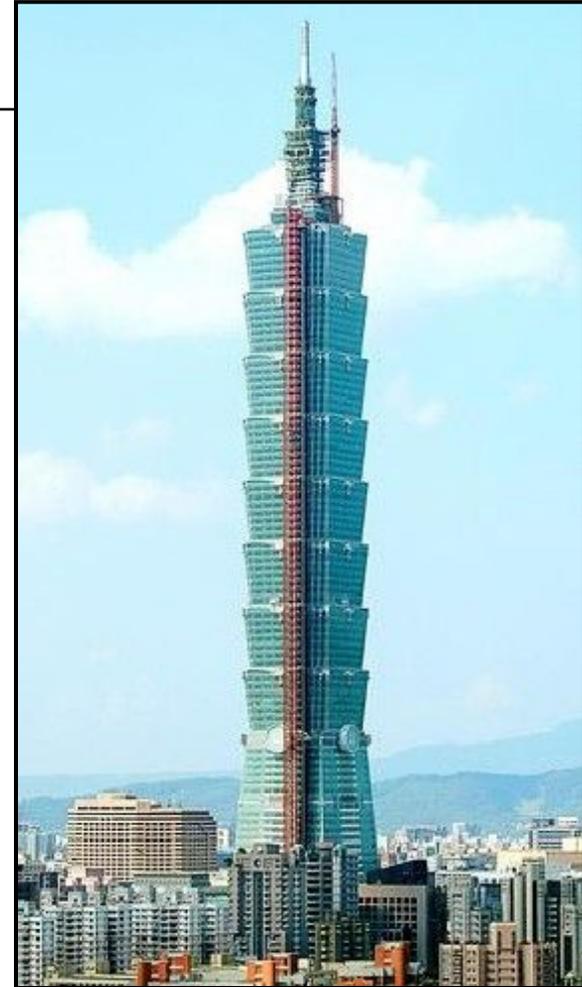
- бетон B80-B90;
- $V/C=0,24-0,28$
- ОК=18-22 см.

Eureka Tower Melbourne, Australia



- высота 300 м;
- бетон C100/115-C60/C75.

Taipei 101, Tajwan



- высота 508 м;
- бетон C70/C85.

Основные факторы получения высокопрочных и долговечных бетонов

- применение высокоактивных цементов с **нормированным минералогическим составом** (содержание $C_3A \leq 8\%$) – СЕМ I-42,5 N, **чистого** (повышение адгезии) **фракционированного** щебня (3-8; 8-16 мм) (минимизация межзерновой пустотности) из **плотных, прочных** пород (гранит, габбро, диабаз, базальт) с кубовидной формой зерен, **классифицированного** песка со стабильным гранулометрическим составом: $M_k = 2,5-3,2$ (снижение водопотребности бетонной смеси);
- предельно **низкое** водоцементное отношение, обеспечивающее высокую первоначальную плотность структуры (применение **суперпластификаторов**);
- применение тонкодисперсных активных минеральных добавок (нанодобавок), **модифицирующих** состав цементного камня и контактной зоны на границе с заполнителем (кремнеземистая пыль, метакаолин, коллоидный кремнезем и др.);
- точное дозирование составляющих бетонных смесей по массе;
- тщательное перемешивание бетонных смесей в смесителях принудительного действия, вибросмесителях или смесителях-активаторах;
- выбор наиболее эффективных методов уплотнения бетонных смесей, при которых обеспечивается коэффициент уплотнения не ниже 0,99;
- создание наиболее благоприятных условий и режимов твердения бетона в конструкциях (**уход** за бетоном).

Влияние пуццолановых добавок (микрокремнезем)



Silica fume – микрокремнезем (кремнеземистая пыль)

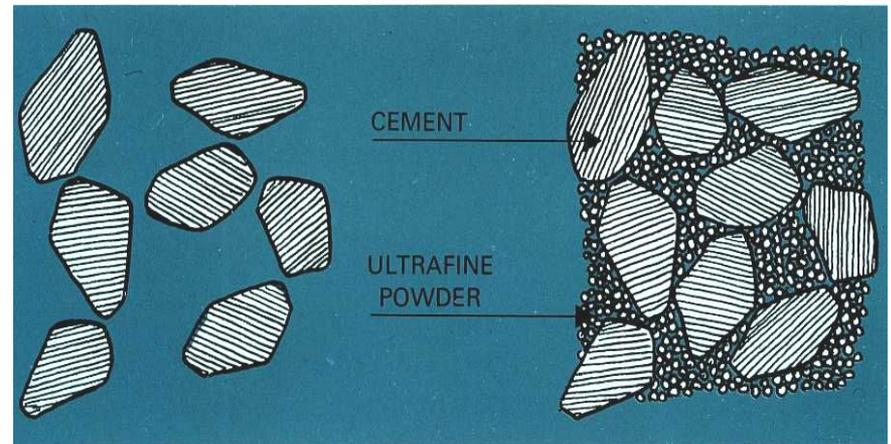
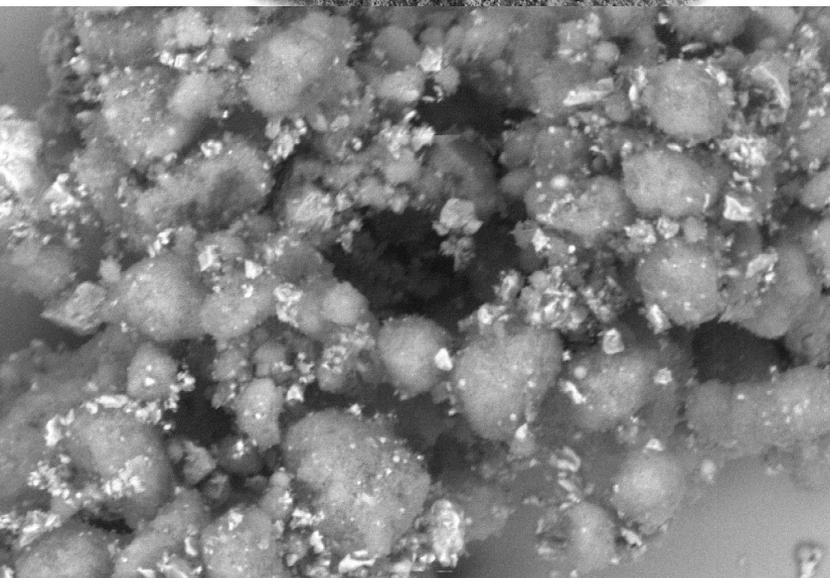
Средний размер частиц < 1 μm;

Насыпная плотность 130-430 кг/м³;

Истинная плотность 2.2 г/см³;

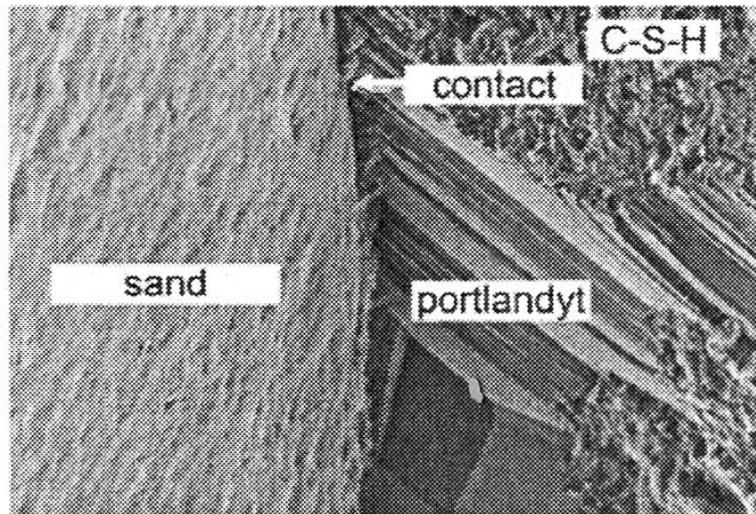
Удельная поверхность (БЕТ) 13000- 30000 м²/кг;

Содержание аморфного оксида кремния 80-90 %.

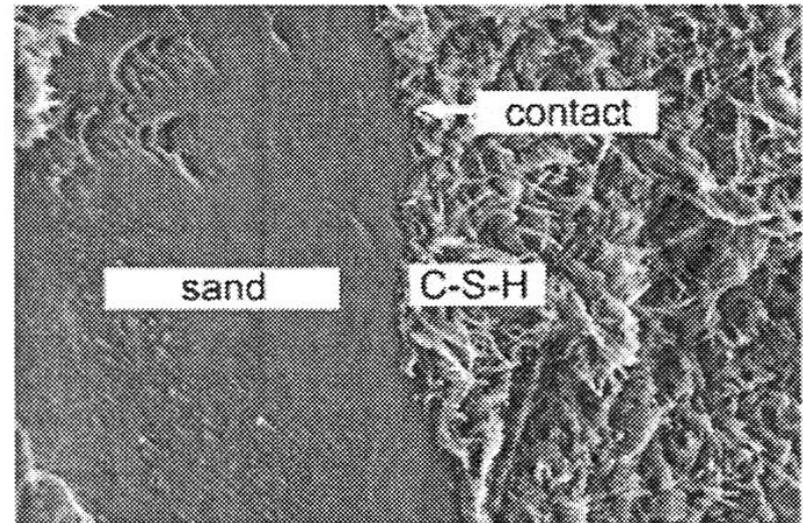


Влияние пуццолановых добавок (микрокремнезем)

a)



b)



Минеральная добавка активизирует процессы гидратации вяжущего, способствует увеличению объема и степени кристалличности образующихся гидратов, среди которых возрастает доля более прочных и устойчивых низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I) с соотношением $C/S \leq 1,0$ вместо первичных кристаллогидратов типа портландита и высокоосновных ГСК, что способствует уплотнению структуры на контакте с добавкой со значительным повышением микротвердости гидратных сростков.

Проектирование состава НРС

Проектирование состава бетона – система технологических расчетов для установления такого соотношения между компонентами бетонной смеси, которое гарантирует требуемую прочность и долговечность бетона в конструкции и заданную удобоукладываемость смеси с учетом технологии ее производства и уплотнения, а также необходимую экономичность (минимальная себестоимость смеси).

$$R_b = AR_{\text{ц}} \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}} - \text{С} \right)$$

Эмпирическая формула прочности бетона **Боломея -Скрамтаева**

НРС: ($\text{В}/\text{Ц} < 0,35$ или $\text{Ц}/\text{В} > 2,86$), $(\text{Ц} + \text{МК})/\text{В}$

$$R_{28} = \frac{k_G \cdot k_C}{\left[\frac{(1 \div 3,1)(W/C)}{1,4 - 0,4 \exp(-11SF/C)} \right]^2}$$

Формула прочности **De Larrard:**

k_G – коэффициент, учитывающий качество заполнителей (4,9...5,2);

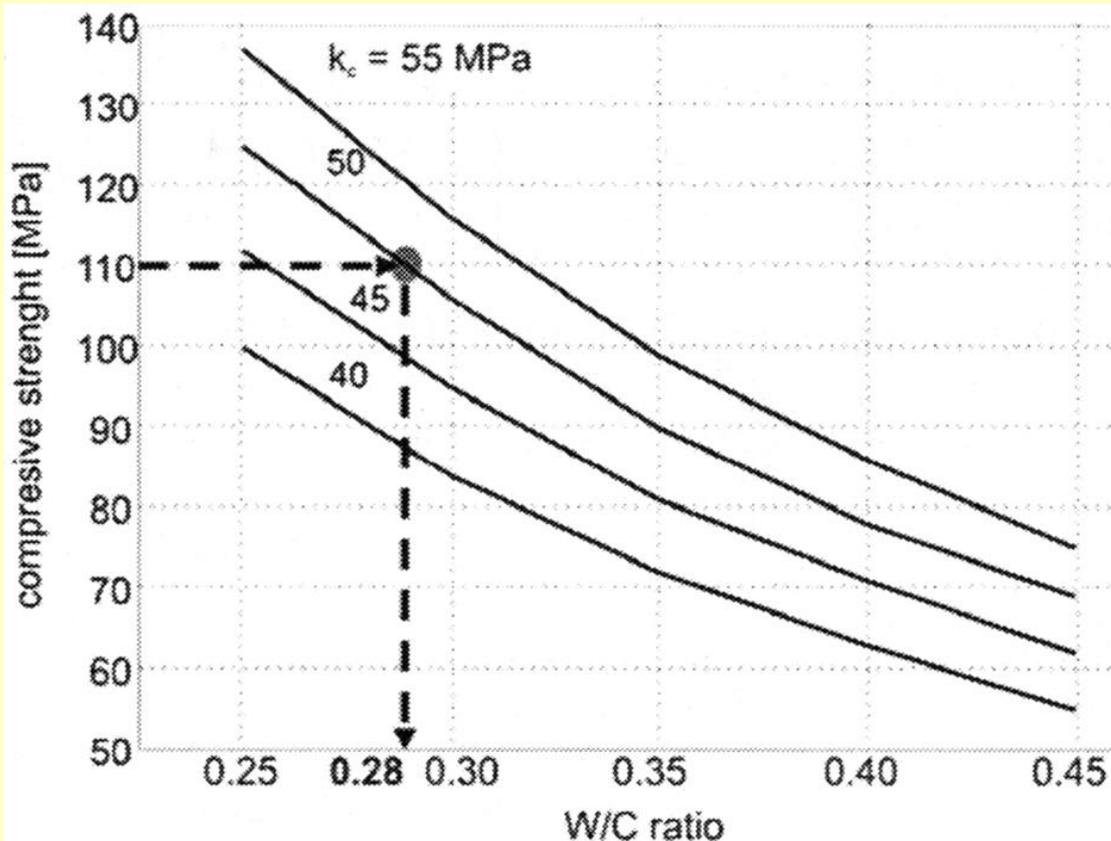
k_C – активность цемента, МПа;

W/C – водоцементное отношение;

SF/C – содержание микрокремнезема от массы цемента, кг/кг

$$\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{п}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} + \frac{\text{МК}}{\rho_{\text{МК}}} + \frac{\text{Д}}{\rho_{\text{д}}} + \text{В} = 1000$$

Ц, П, Щ, МК, Д, В – расход цемента, мелкого заполнителя, крупного заполнителя, микрокремнезема, добавки и воды, соответственно [кг/м³];
 $\rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{п}}, \rho_{\text{щ}}, \rho_{\text{МК}}, \rho_{\text{д}}$ – плотность [кг/дм³].



$$\text{Ц} = 400 - 500 \text{ [кг/м}^3\text{]}$$

$$\text{МК} = (0,1 - 0,15) \text{Ц [кг/м}^3\text{]}$$

$$\text{В} = \frac{\text{В}}{\text{Ц}} \cdot \text{Ц}$$

$$V_{\text{ц}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В} + \frac{\text{МК}}{\rho_{\text{МК}}}$$

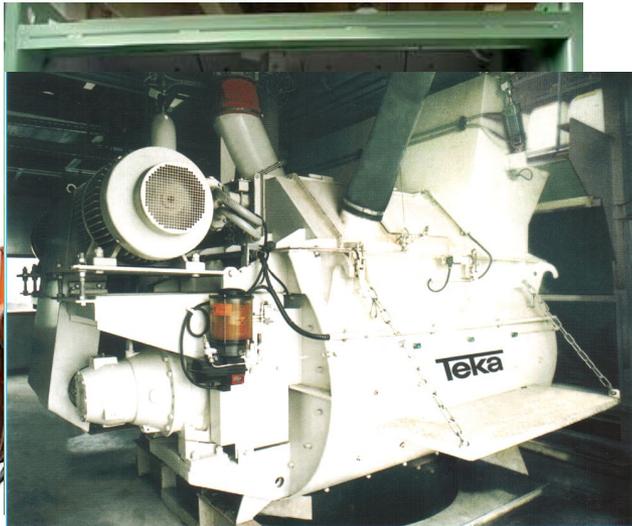
$$V_3 = 1000 - V_{\text{ц}}$$

Мост Конфедерации, Нортумберлендский Пролив (Prince Edward Island / (New Brunswick) , 1997

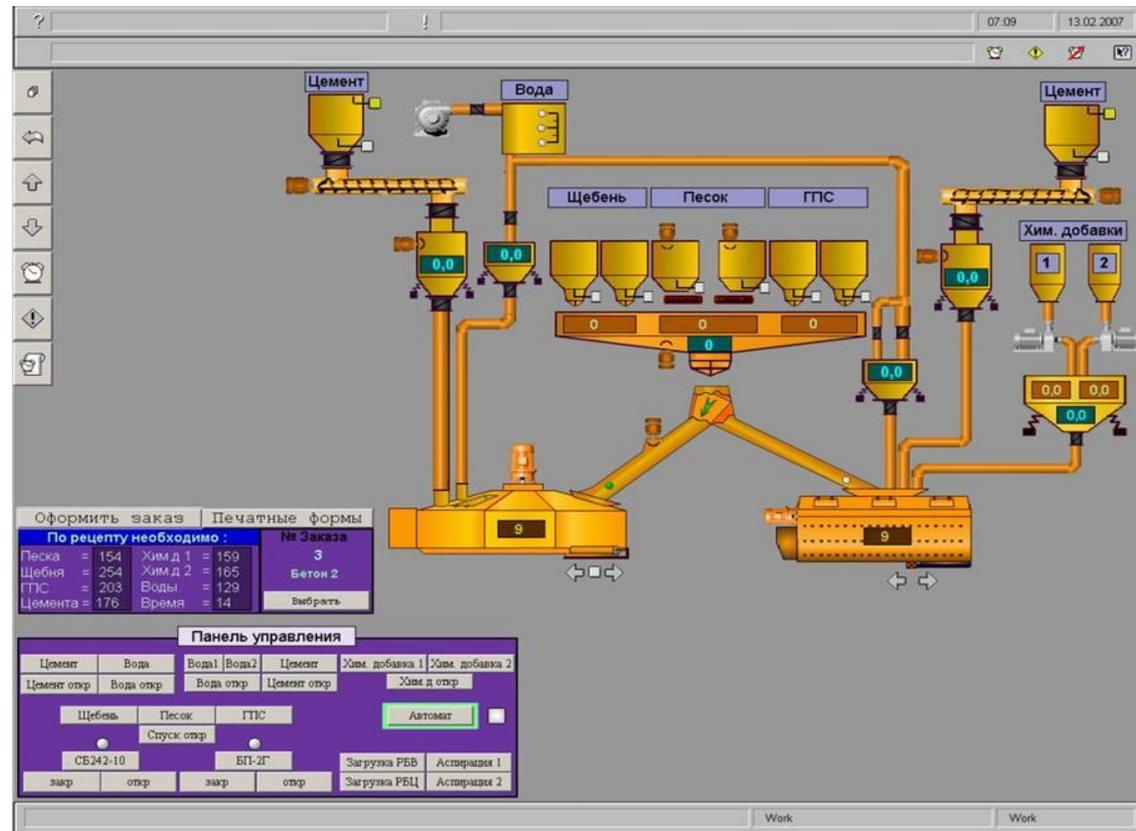
- Портландцемент 398 кг/м³
- Зола-унос: 45 кг/м³
- Микрокремнезем: 32 кг/м³
- В/Ц: 0.30
- Пластификатор: 1.7 л/м³
- HRWR (СП): 15.7 л/м³
- Прочность при
сжатии (91 сут.) 60 МПа



Перемешивание бетонной смеси, транспортирование, укладка и уплотнение



Перемешивание в бетоносмесителях принудительного действия.
Длительность – не менее 6 минут.





При транспортировании бетонной смеси обязательно необходимо учитывать расстояние и время доставки, а также температуру окружающего воздуха.



Уход за бетоном

Внешний уход

Внутренний уход

Внешний водный уход

Водная
запруда

Распыление
воды

Обработка
туманом

Водонасыщен-
ные покрытия

Внешний безводный уход

Водонепрони-
цаемая бумага

Синтетические
покрытия

Мембраны

Внутренний водный уход

Водо-
насыщенные
легкие
заполнители

Супер-
абсорбенты

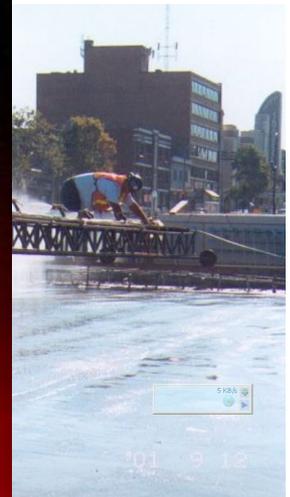
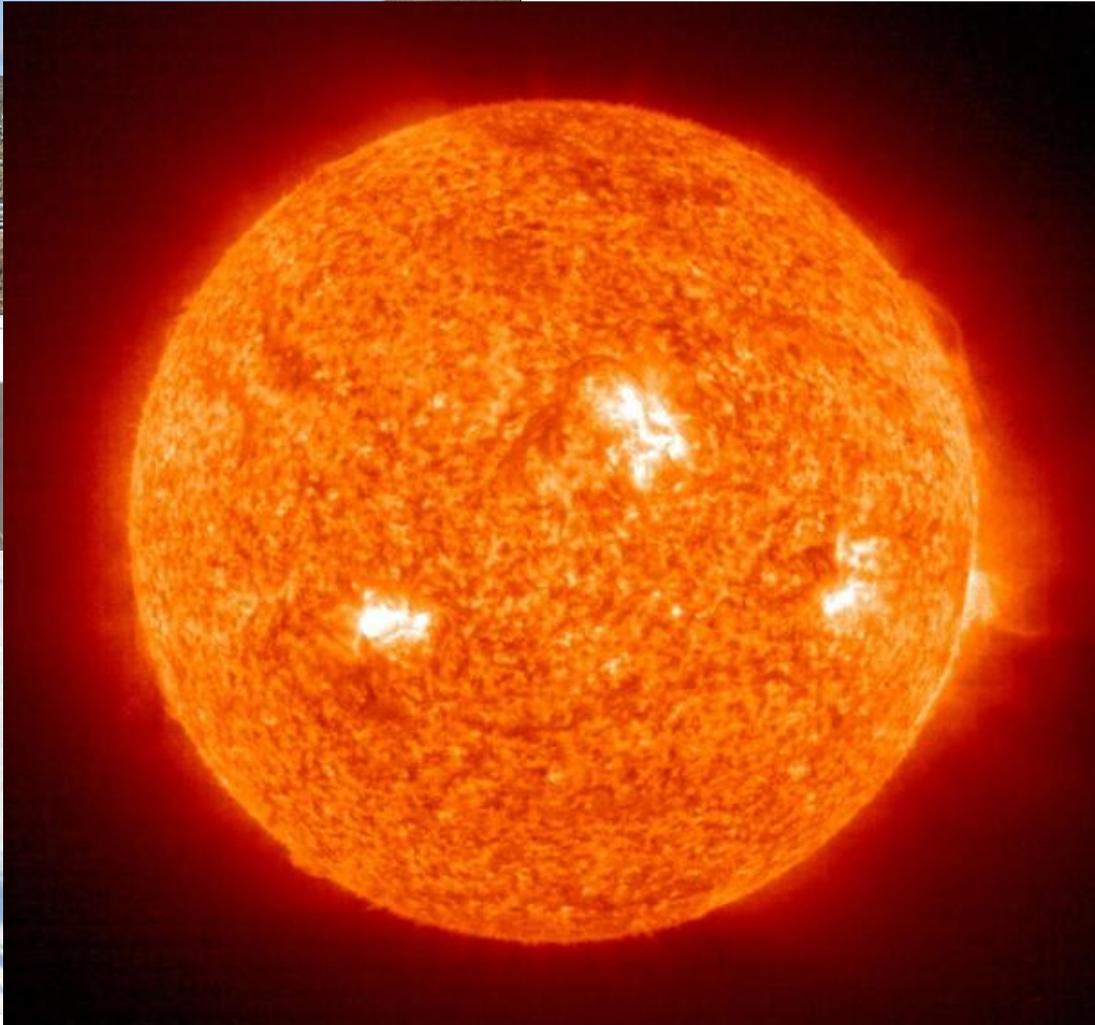
Внутренний безводный уход

Водо-
растворимые
химические
добавки

Классификация способов ухода за бетоном, основанных на контроле за его влажностью (RILEM TC-196 "Internal Curing of Concrete")

Внешний уход за бетоном

Влажностный уход – первые 7 суток твердения



Внутренний уход за бетоном



Для полной гидратации портландцемента необходимо, чтобы В/Ц было больше 0,5.

При В/Ц менее 0,38 в цементном камне отсутствуют капиллярные поры. В этом случае транспорт воды во внутренние слои бетона при твердении в воде практически невозможен.

один резервуар

НРС: В/Ц менее 0,3, при гидратации цемента происходит обезвоживание капилляров («самовысушивание»).

Происходит аутогенная усадка, приводящая к трещинообразованию в бетоне.

Внутренний уход за бетоном

Применение в составе бетона предварительно водонасыщенного пористого заполнителя (Light Weight Aggregate – LWA)

Пемза



Перлит



Вспученный
глинистый
сланец

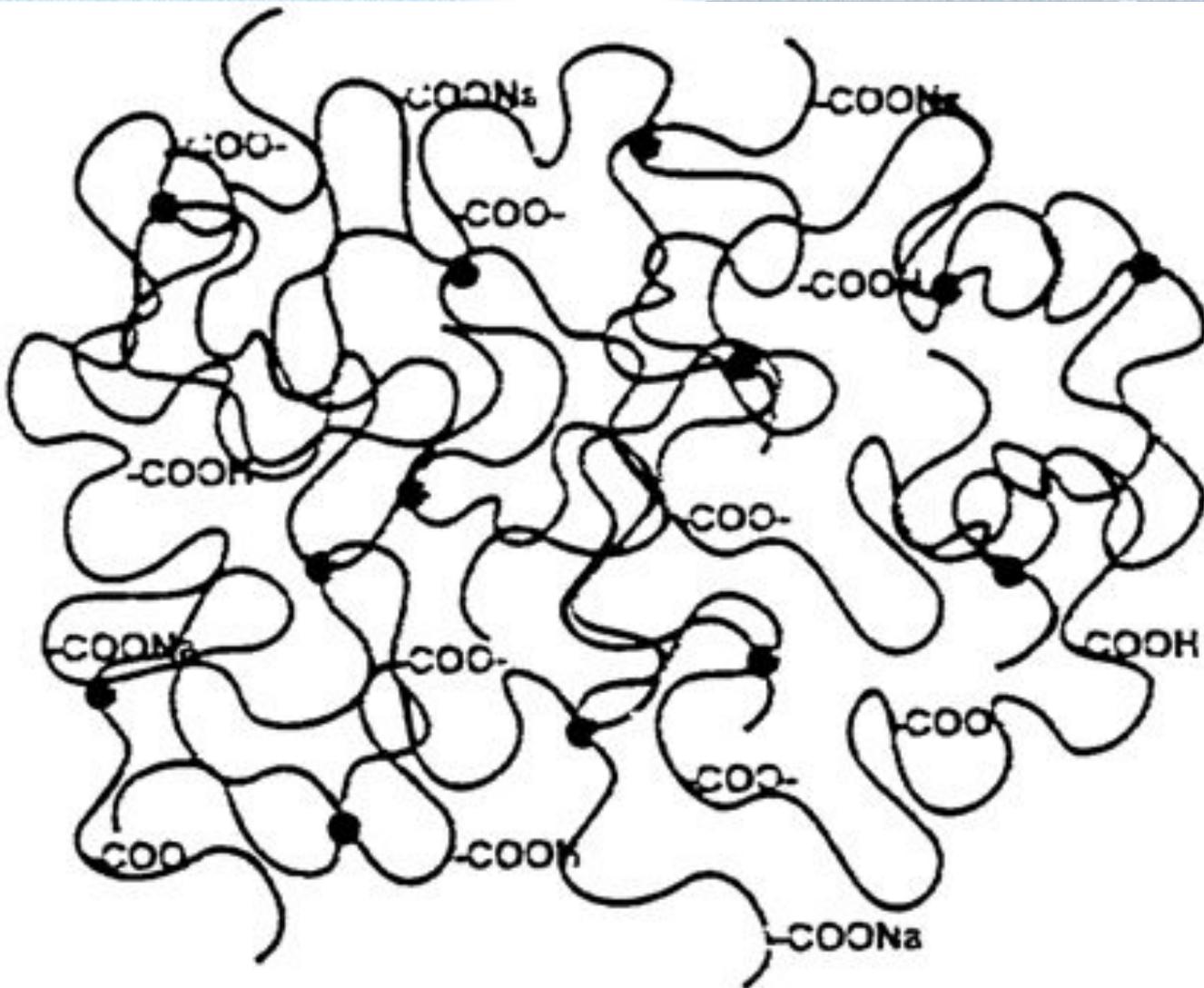
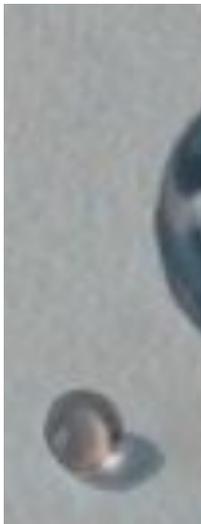


Шлак
ферросплавов



Внутренний уход за бетоном

Superabsorbent polymers (SAP)



Ultra High Strength Concretes (UHSC) – особо высокопрочные бетоны



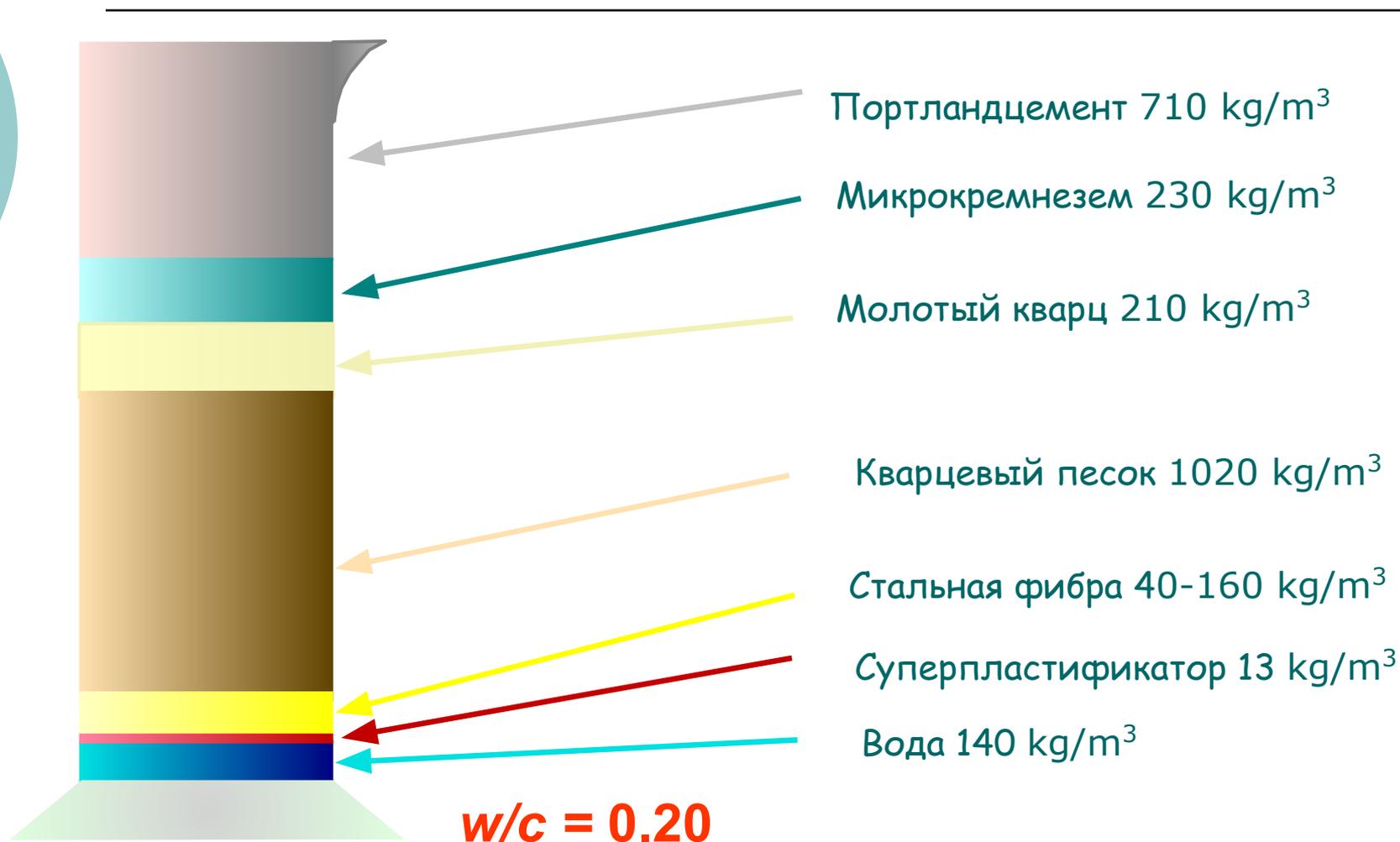
Reactive Powder Concretes (RPC) – реакционные порошковые бетоны

- Кубиковая прочность при сжатии: 200-800 МПа;
- Прочность на растяжение при изгибе: до 25-40 МПа;
- Прочность при растяжении: 8-10 МПа;
- Энергия разрушения 3000 Дж/м²;
- Модуль упругости: до 60 ГПа;
- Средняя плотность: 2500-3000 кг/м³

Принципы RPC:

- повышение однородности бетона путем уменьшения максимального размера частиц (исключение из состава крупного заполнителя);
- формирование оптимальной плотности за счет использования фракционированных ультрадисперсных материалов (микронаполнителей);
- предельно низкое содержание воды в бетонной смеси (за счет использования супер- (гипер) пластификаторов);
- введение в состав бетона короткой стальной фибры для повышения предела прочности при растяжении;
- создание наиболее оптимальных условий твердения бетона (твердение при избыточном давлении и повышенной температуре).

Состав реакционного порошкового бетона



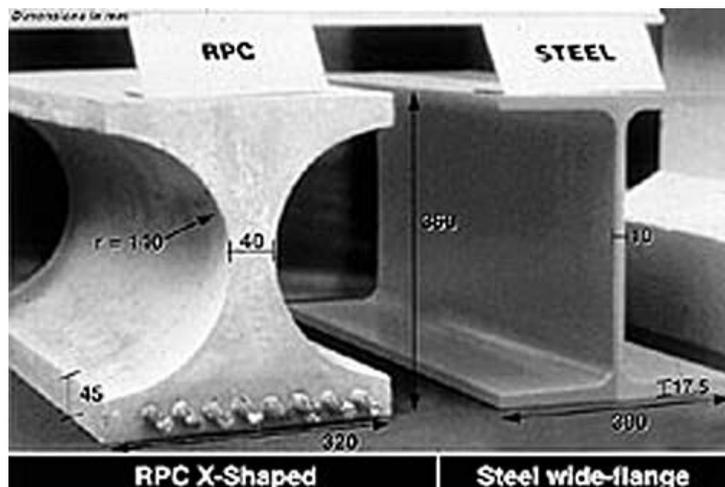
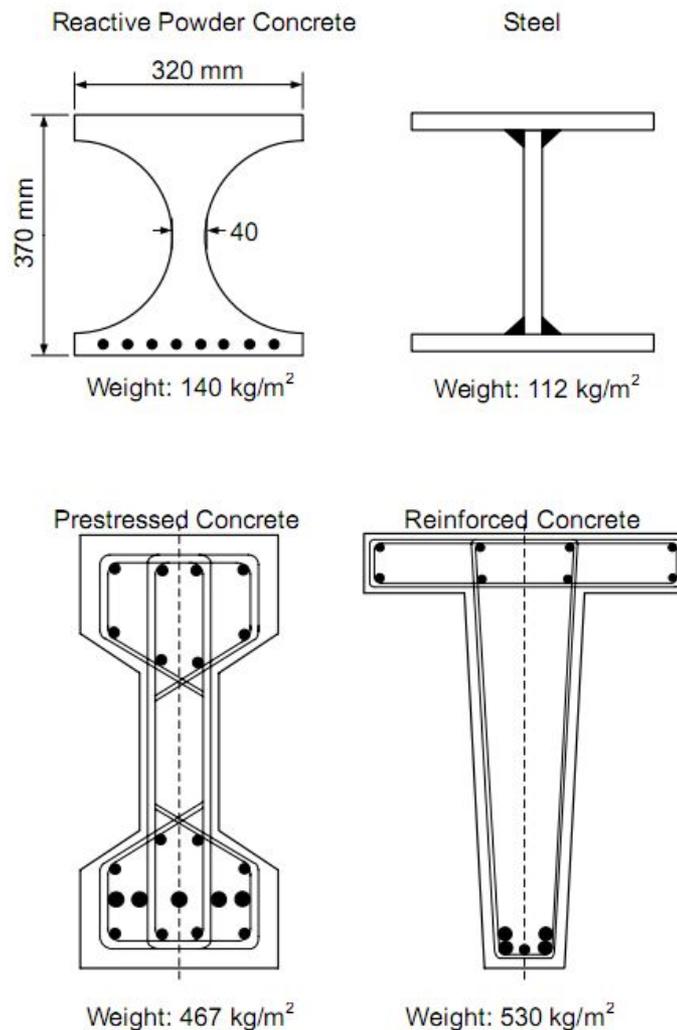
Области рационального применения RPC

сборные железобетонные конструкции, в т. ч. преднапряженные без косвенного армирования (высокая растяжимость бетона за счет применения микрофибры);

элементы мостовых сооружений, промышленные полы (высокая абразивная устойчивость);

преднапряженные конструкции сложной геометрической формы;

- контейнеры для ядерных отходов и ядовитых веществ (высокая плотность, очень низкая проницаемость);
- строительные элементы для банков и компьютерных центров (высокая механическая прочность, сопротивление ударным воздействиям, огнестойкость);
- напорные и безнапорные трубы

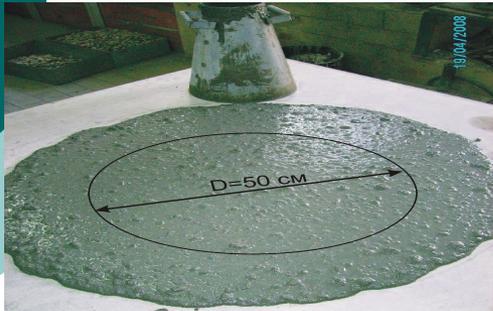


Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны



Самоуплотняющийся бетон (СУБ) – это многокомпонентный композиционный силикатный материал, который в свежеприготовленном состоянии обладает таким уровнем текучести и подвижности, что бетонная смесь способна заполнять опалубку в процессе укладки только за счет собственного веса и достигать требуемой степени уплотнения без применения какого-либо внешнего уплотняющего воздействия.

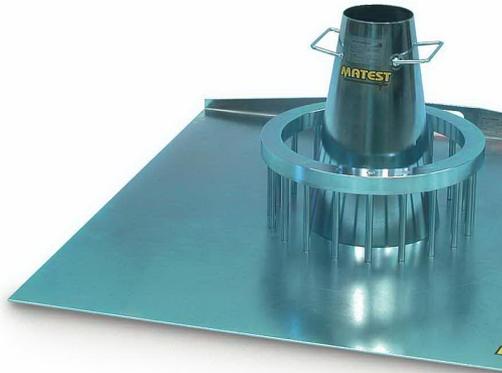
Методы определения подвижности смесей



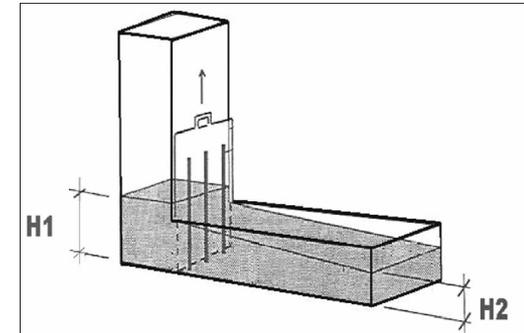
Slump flow – Abrams cone
650 – 800 mm



V Funnel
8-12 s

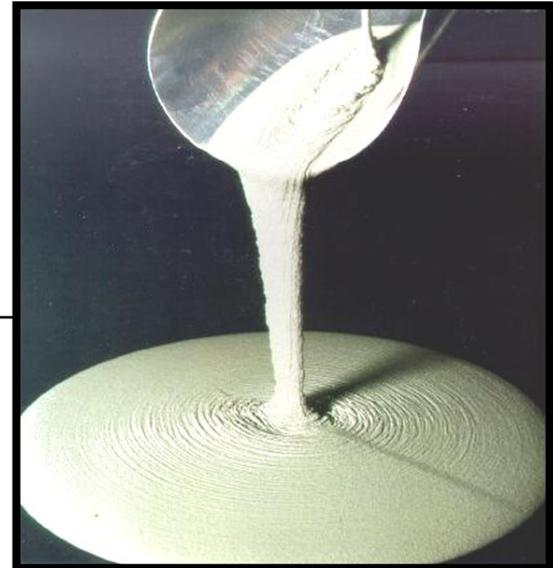


J Ring
0 – 10 mm

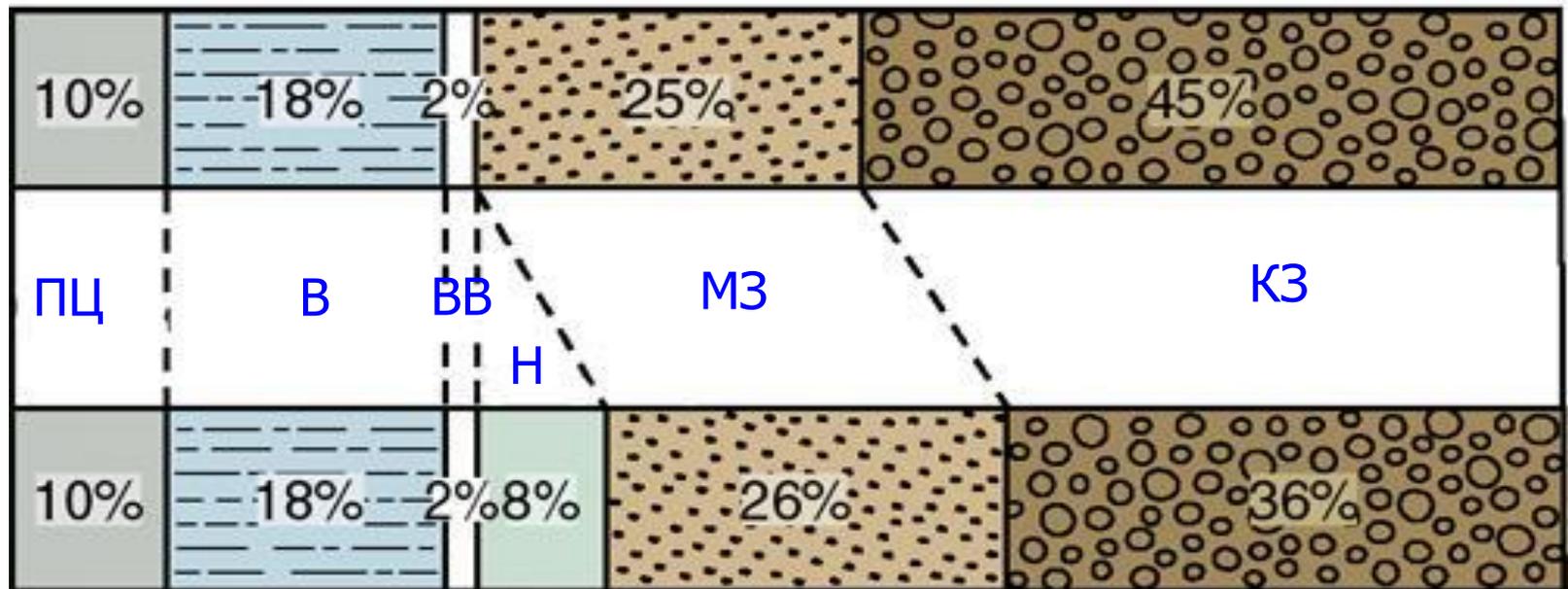


L Box
 $H_2 / H_1 = 0,8-1,0$

Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны - состав

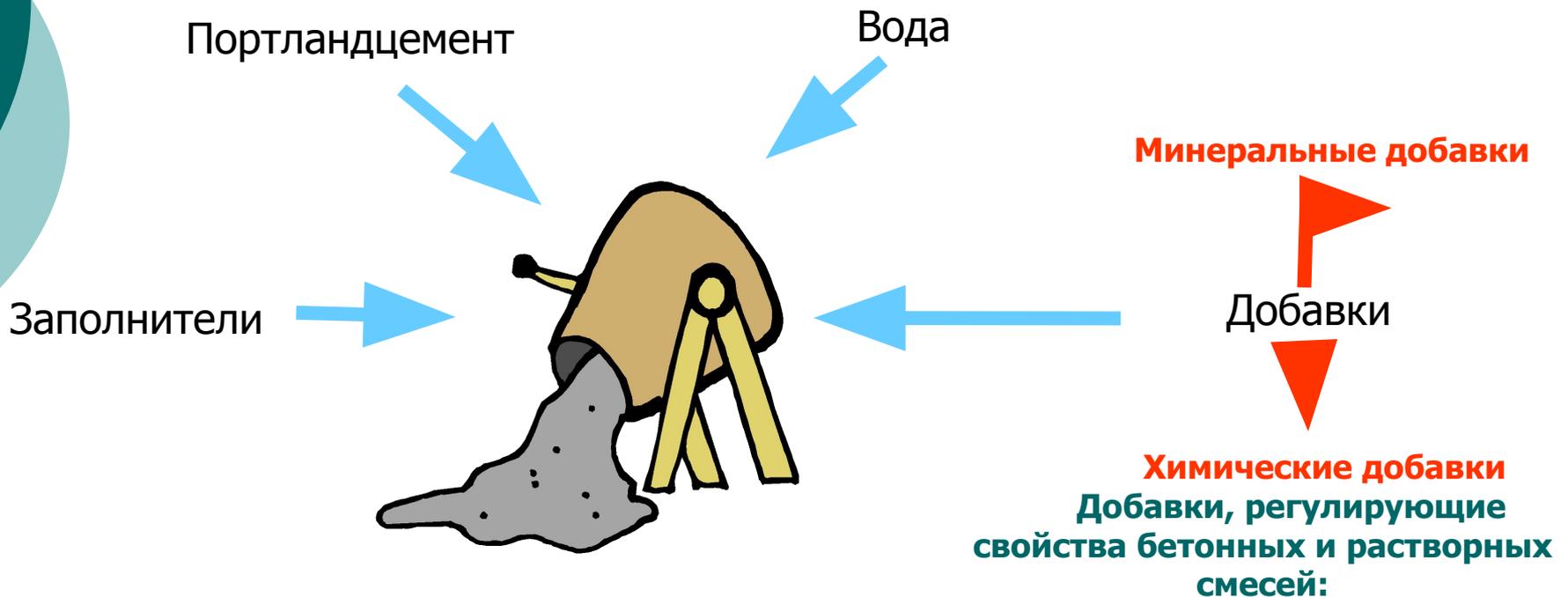


Обычная бетонная смесь



SCC

Состав бетонной смеси



Бетонная смесь

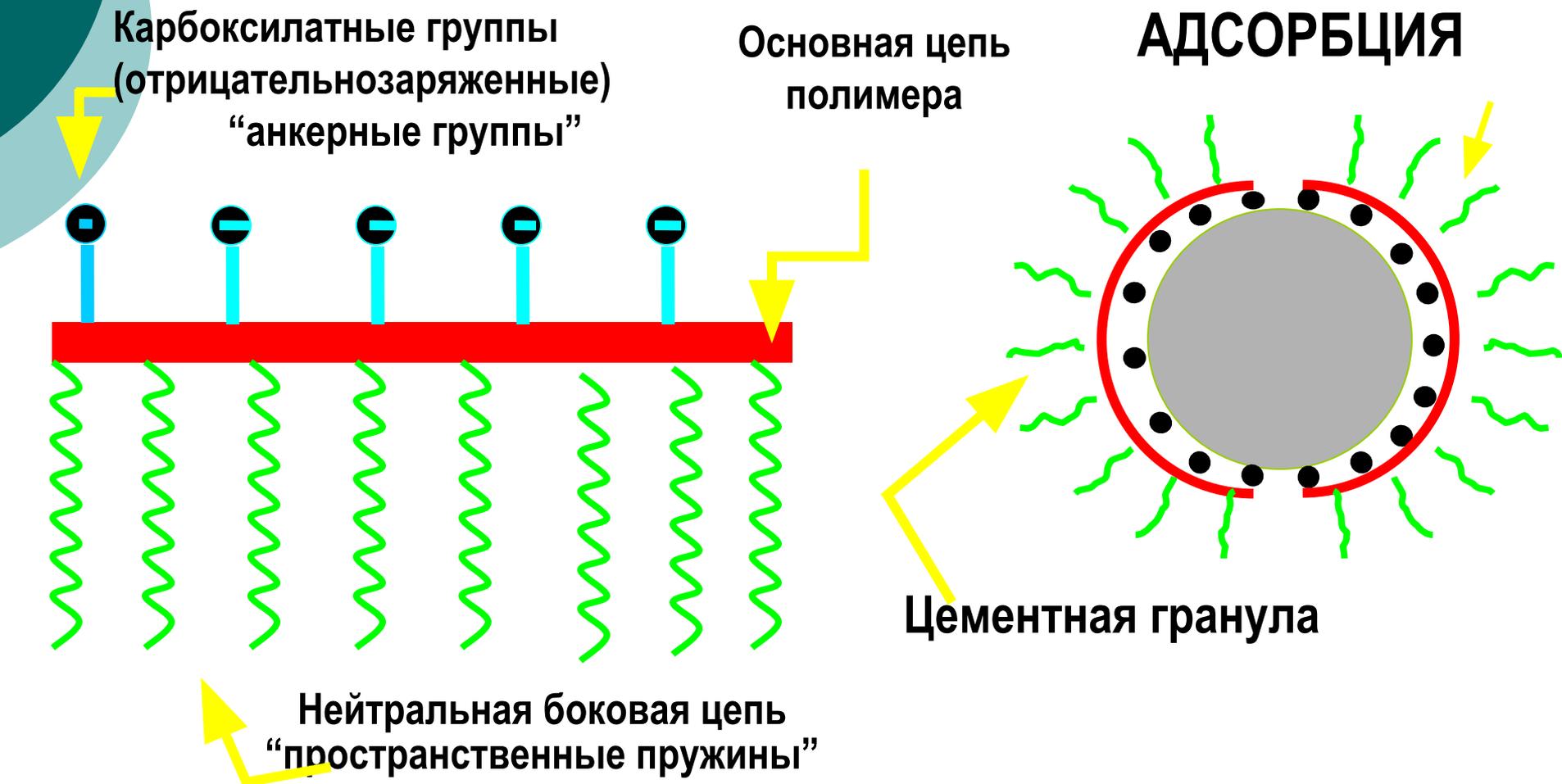
- а) пластифицирующие;
- б) стабилизирующие;
- в) водоудерживающие;
- г) улучшающие перекачиваемость;
- д) регулирующие сохраняемость бетонных смесей;
- е) замедляющие схватывание;
- ж) ускоряющие схватывание;

Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны

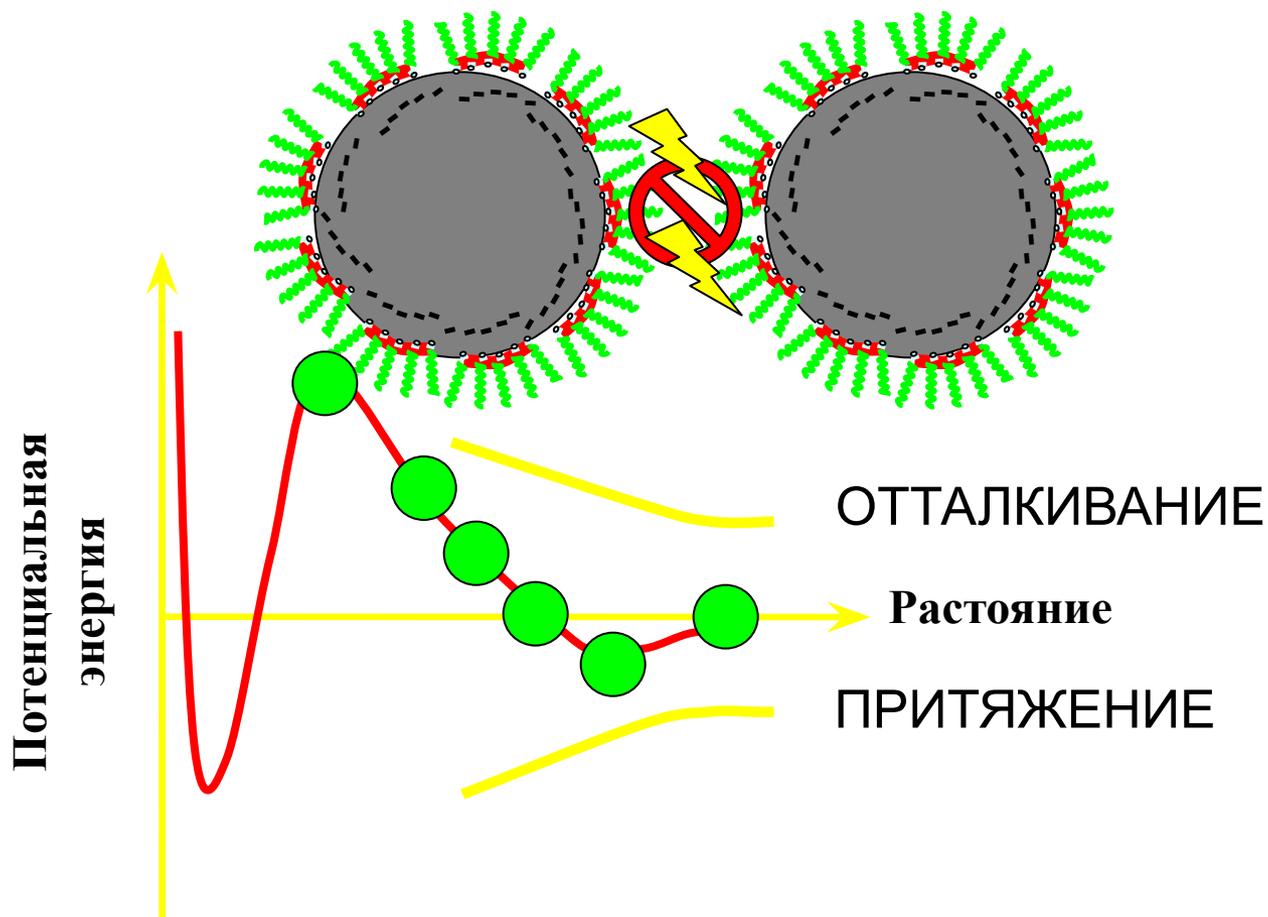


МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ ЦЕМЕНТА ЭЛЕКТРОСТЕРИЧЕСКИМ ОТТАЛКИВАНИЕМ



РЕОЛОГИЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПАСТЫ С СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРАМИ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ



РЕОЛОГИЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПАСТЫ С ПЛАСТИФИКАТОРАМИ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Одновременное присутствие отрицательно заряженных и неионных групп в молекуле полимера повышает его диспергирующую способность

ЭЛЕКТРОСТЕРИЧЕСКОЕ ОТТАЛКИВАНИЕ

ОТТАЛКИВАНИЕ

Растояние

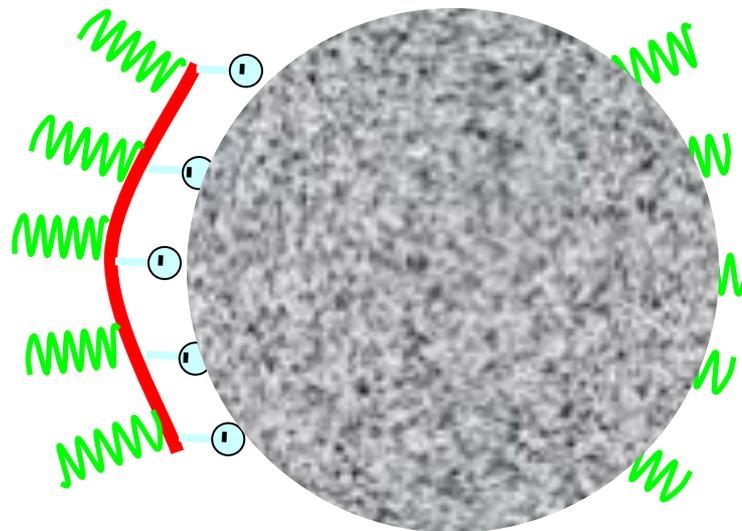
ПРИТЯЖЕНИЕ

НИЗКАЯ ВЯЗКОСТЬ



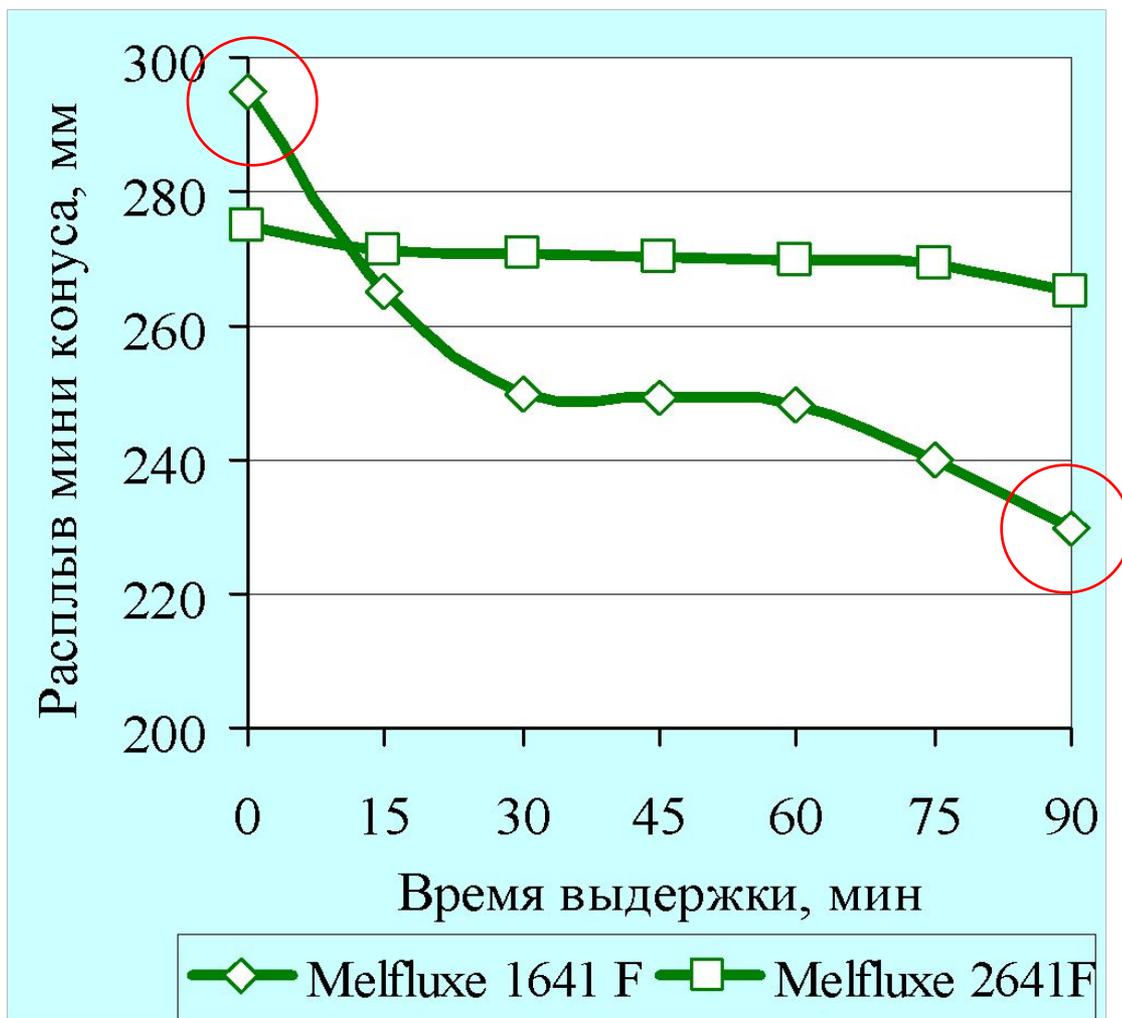
Сохранение удобоукладываемости контролируется уровнем адсорбции полимера

МЕДЛЕННО

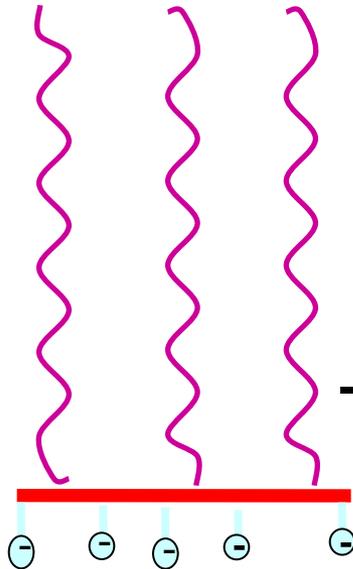
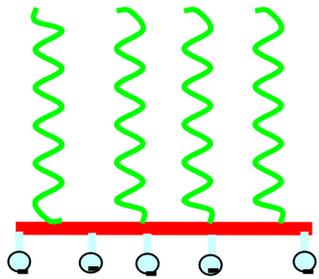
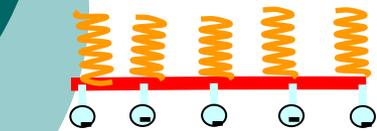


БЫСТРО

Зависимость подвижности цементных паст от времени выдержки



Ключевые отличия полимеров:

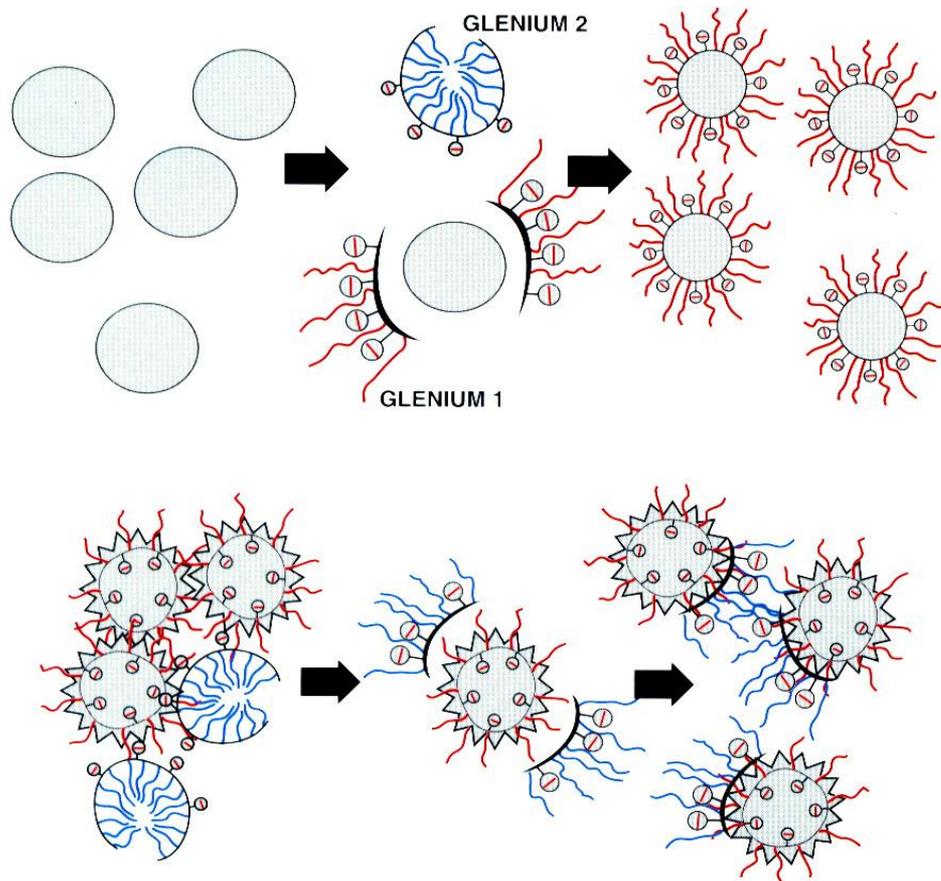


- длина основной цепи;

- длина боковой цепи;

- плотность заряда основной цепи

Сохранение удобоукладываемости контролируется уровнем адсорбции полимера

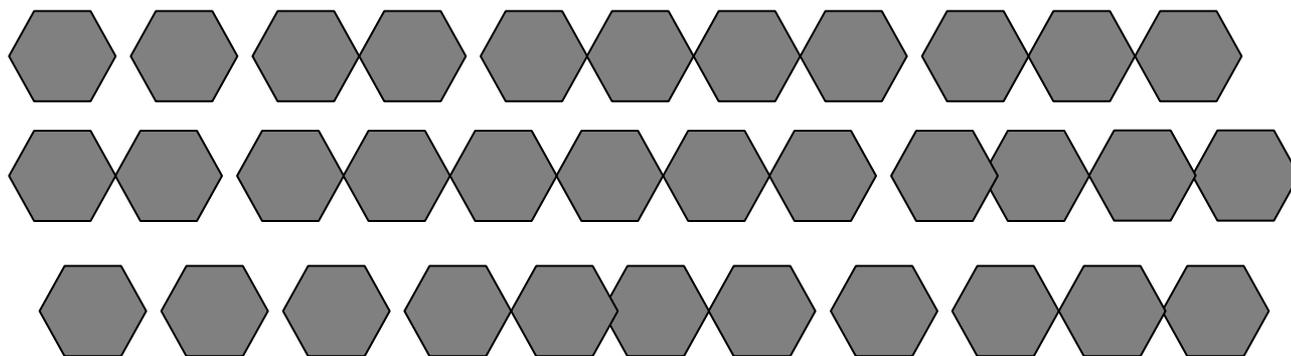
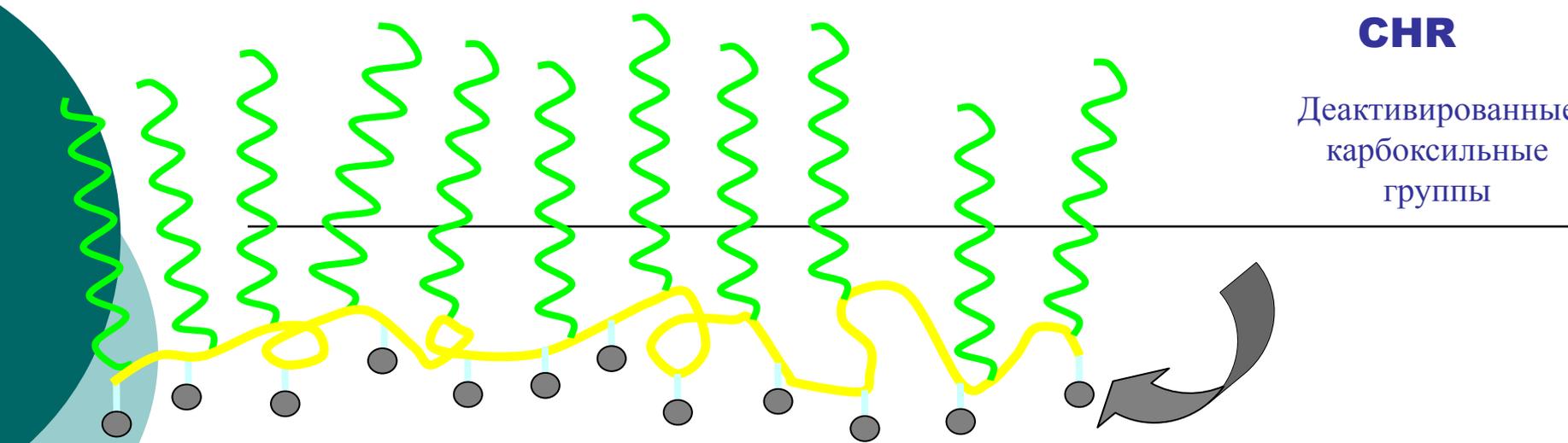


GLENIUM ACE 30 (FM) - добавка в технологии сборного железобетона при производстве конструкций, в т.ч. предварительно напряженных из быстротвердеющего бетона. GLENIUM ACE 30 (FM) позволяет получить бетонные смеси с высокой начальной подвижностью (**быстрая адсорбция молекул на цементных частицах**) с очень низкими значениями В/Ц, что обеспечивает высокую раннюю и марочную прочность бетонов.

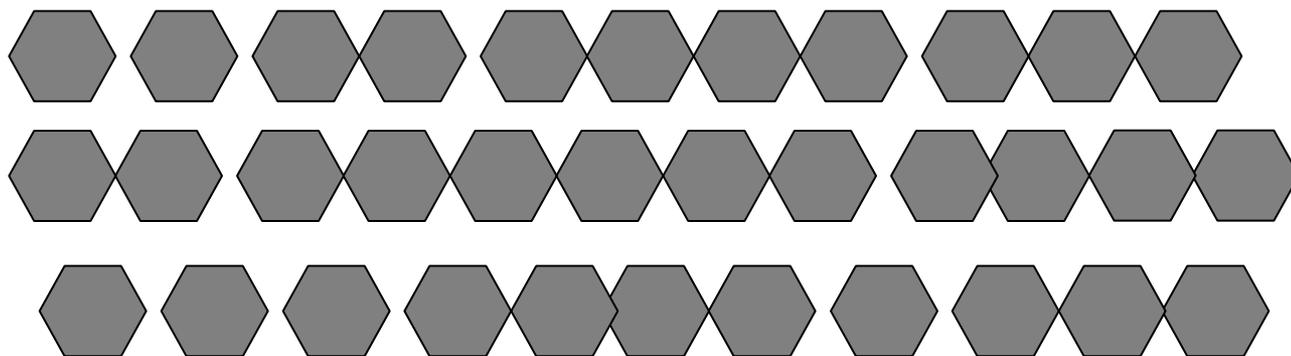
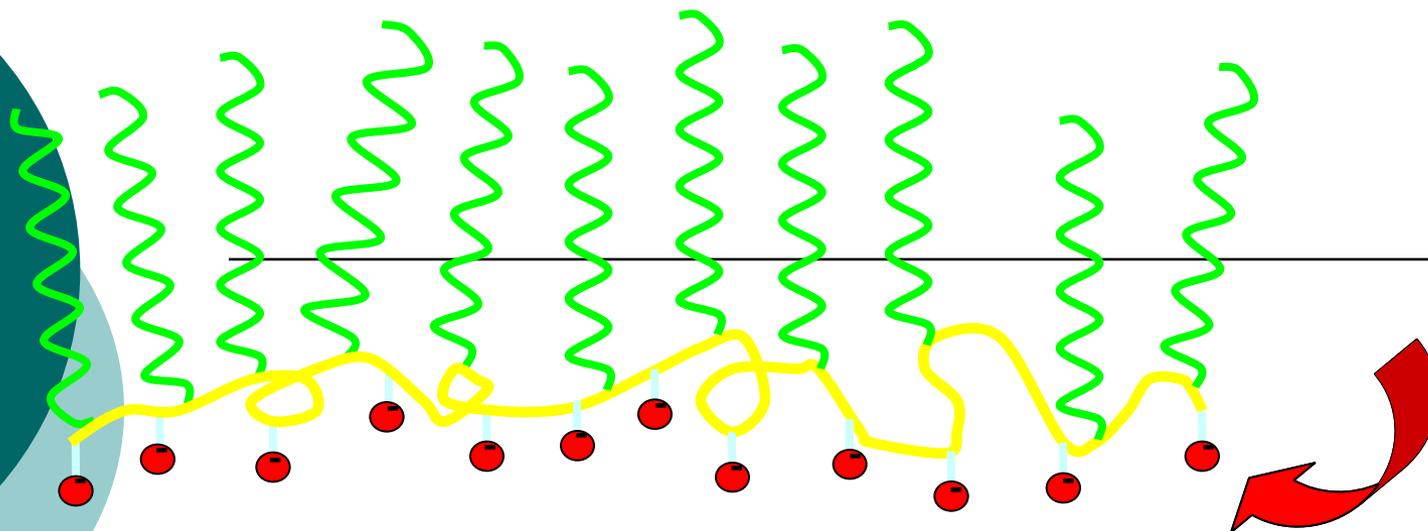
GLENIUM SKY 505 (FM)/(BV) – добавка в технологии товарного бетона, позволяет производить высококачественные бетоны из литых бетонных смесей с длительным сохранением подвижности (**медленная адсорбция молекул на частицах цемента**).

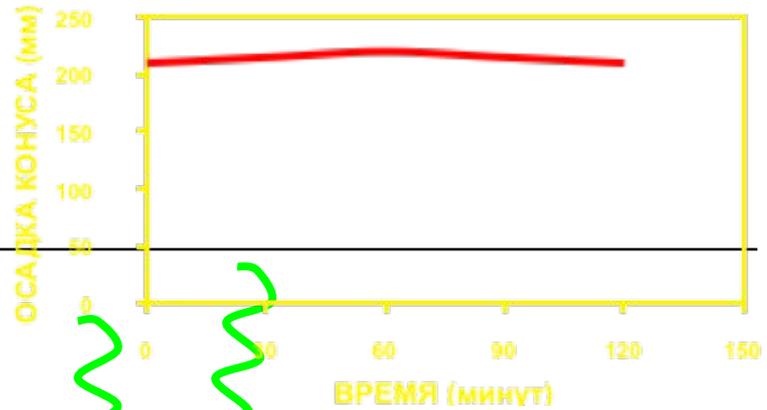
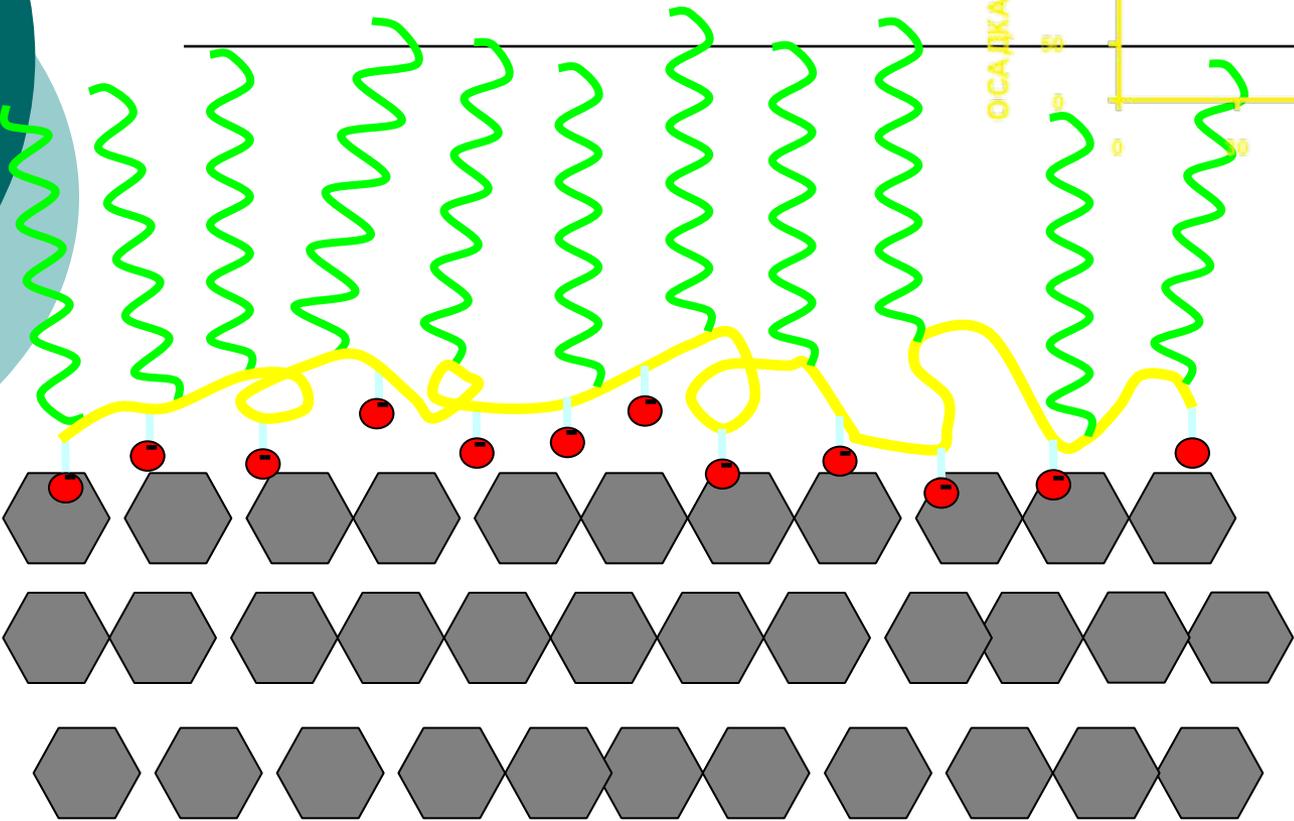
CHR

Деактивированные
карбоксильные
группы

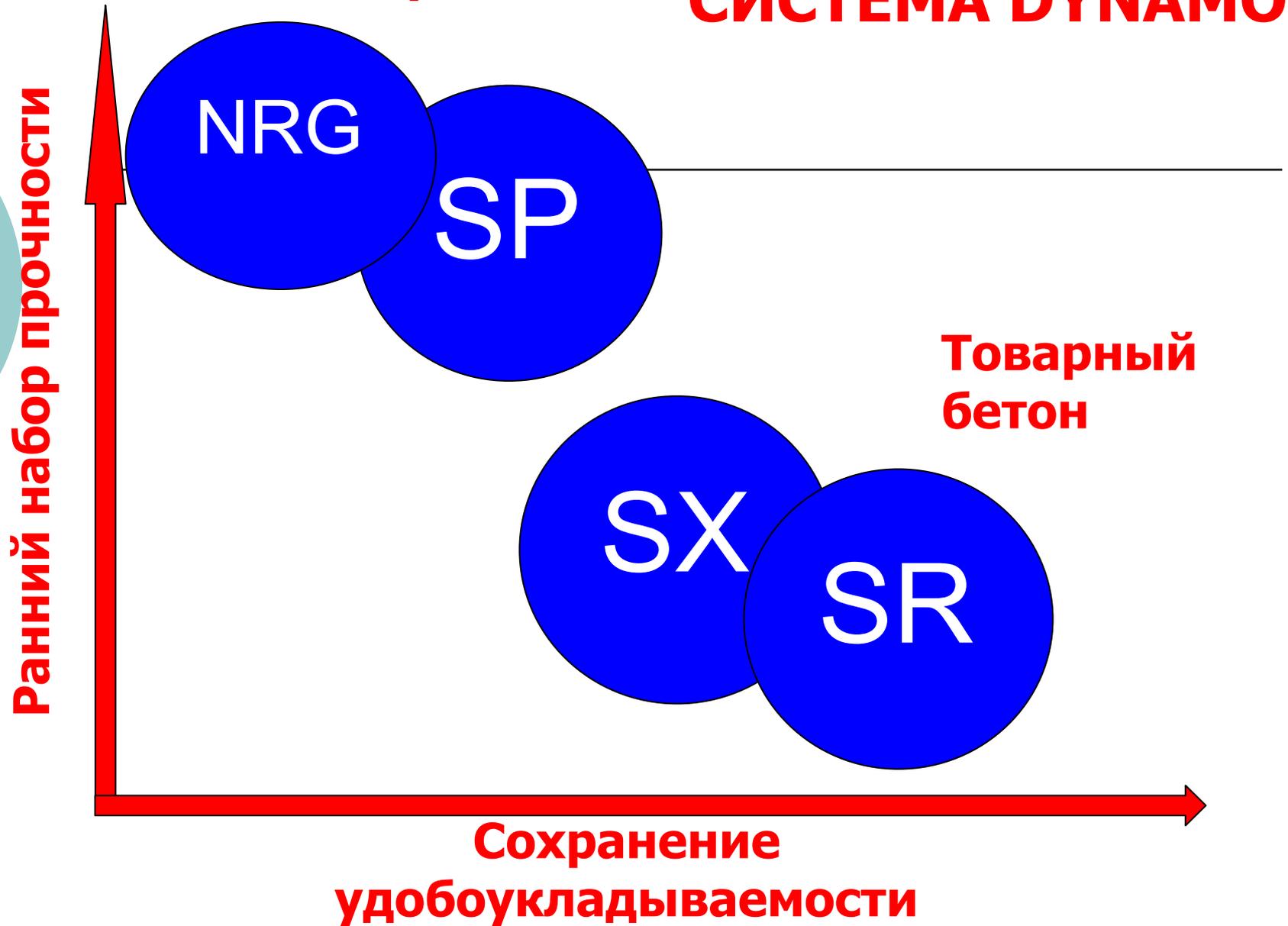


СН
Деактивированные
карбоксильные
группы





Сборный Ж/Б СИСТЕМА DYNAMON

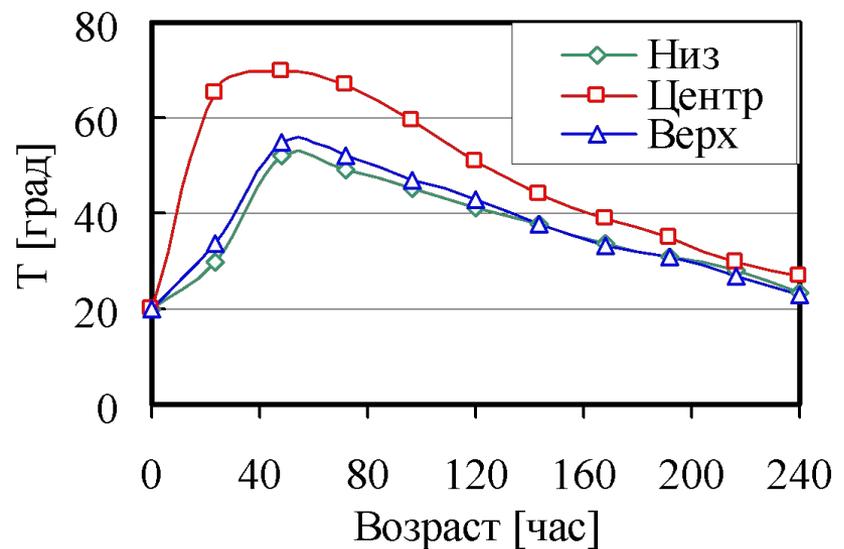


Бетон с высоким содержанием золы-уноса (High Volume Fly-ash Concrete)

Malhotra V.M., Mehta P.K. - CANMET, Ottawa, Canada

Обычно количество золы-уноса, применяемой взамен портландцемента не превышает 15-20%. В этом случае не решаются проблемы повышения сульфатостойкости бетона, стойкости к щелочной коррозии заполнителя и термического трещинообразования (Mehta P.K.).

Термическое трещинообразование в массивных конструкциях в раннем возрасте твердения



Бетон с высоким содержанием золы-уноса (High Volume Fly-ash Concrete)

High-Volume Fly Ash Concrete (HVFAС) - [Malhotra V.M.](#),
[Mehta P.K.](#) :

- минимальный расход золы 50%;
- низкий расход воды – менее 130 л/м³;
- расход цемента – менее 200 кг/м³;
- водовяжущее отношение менее 0,3 (применение суперпластификаторов);
- для обеспечения морозостойкости – применение воздухововлекающих добавок;
- для повышения ранней прочности бетона – часть золы заменить на более реакционный микрокремнезем.

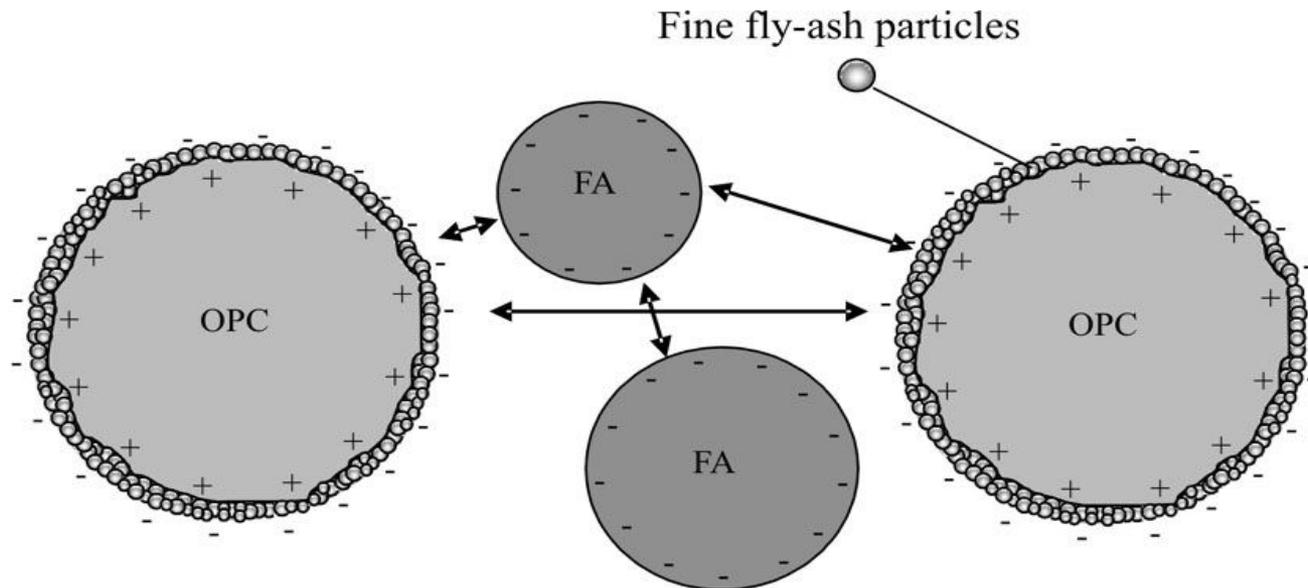
Высокопрочный бетон с большим содержанием золы-уноса с добавкой суперпластификатора – относительно низкая себестоимость, низкая проницаемость, уменьшение тепловыделения – для крупных колонн и др. массивных конструкций. Очень высокая стойкость бетона к действию хлоридов - [Malhotra V.M.](#)

Бетон с высоким содержанием золы-уноса (High Volume Fly-ash Concrete)

При применении золы в количестве более 50% от массы цемента она может проявлять водоредуцирующий эффект до 20%, т.е. выполнять роль эффективного пластификатора. Это происходит по причине:

- адгезии более мелких частиц золы на противоположно заряженных частицах клинкерных фаз, что вызывает их отталкивание с высвобождением иммобилизованной воды;

Z-потенциал золы $-12...-14$ mV, портландцемента $+2,17$ mV.



Бетон с высоким содержанием золы-уноса (High Volume Fly-ash Concrete)

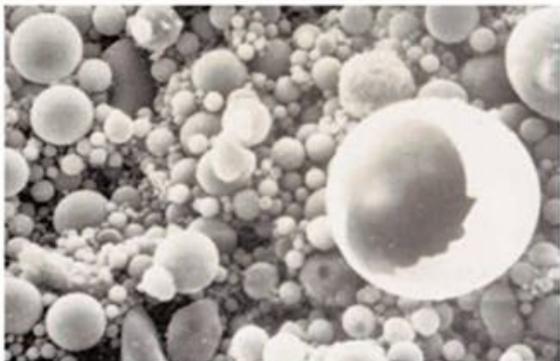
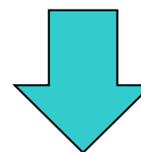


Fig. 3-2. Scanning electron microscope (SEM) micrograph of fly ash particles at 1000X. Although most fly ash spheres are solid, some particles, called cenospheres, are hollow (as shown in the micrograph). (54048)

- снижения трения между частицами золы и портландцемента, т.к. последние приобретают форму сфероидов;
- снижения пустотности заполнителя в результате улучшения гранулометрического состава смеси цемента с частицами золы;
- увеличения количества вяжущей части в бетонной смеси (т.к. зола имеет меньшую истинную плотность ($2,2 \text{ г/см}^3$, чем портландцемент $3,1 \text{ г/см}^3$)).

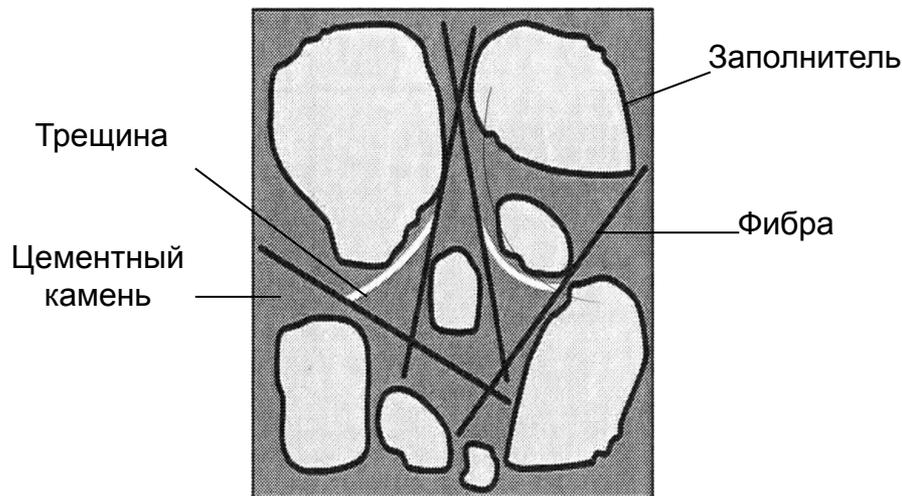


Повышение когезии бетонной смеси и подвижности, снижение расслаиваемости, улучшение прокачиваемости



Дисперсно-армированный бетон (Fibre-reinforced concrete)

Фибробетон — это бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами). Фибробетон обладает повышенной трещиностойкостью, прочностью на растяжение, ударной вязкостью, сопротивлением истираемости. Изделия из этого бетона можно изготавливать без армирования специальными сетками и каркасам, что упрощает технологию приготовления изделия и снижает ее емкость. Для армирования бетона применяют различные *металлические и неметаллические волокна*.



Эффективность влияния различных видов волокон на свойства бетона зависит от соотношения модулей упругости армирующих волокон и бетона. При отношении $E_b/E_c > 1$ возможно получение фибробетонов с повышенной прочностью на растяжение и трещиностойкостью. При $E_b/E_c < 1$ повышаются ударная прочность и сопротивление материала истираемости.

Дисперсно-армированный бетон (Fibre-reinforced concrete)



которые
ерсно-

гр	П Н [г]
0	



1,0-3,0	70-80	1,5-4,5
0,7-1,5	12-40	2-3
1,0-3,0	230-400	0,5-1,0

Дисперсно-армированный бетон (Fibre-reinforced concrete)

Свойство	Тип фибры	
	Стальная	Полипропиленовая
Усадка	↓≈30-50%	↓≈30-50% (преим. пластическая)
Прочность при сжатии	↑≈10-30%	незначит. повышение
Прочность при растяжении	↑≈20-40%	незначит. повышение
Прочность при изгибе	↑≈30-70%	незначит. повышение
Ударная прочность	↑≈ в 6 раз	↑≈ в 3 раза
Модуль упругости	Без изменений	Без изменений
Водопоглощение	Без изменений	Без изменений
Морозостойкость	↑≈30-60%	↑≈30%
Истираемость	↓≈50%	Без изменений
Водонепроницаемость	Без изменений или незначит. повышение	незначит. ↓≈20%

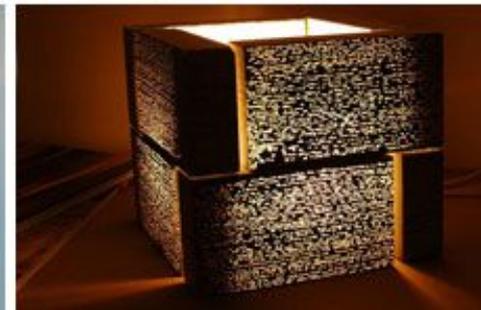
Translucent Concrete Светопрopusкающий бетон

Aron Losonczy - LiTraCon® (Будапештский технический университет)

Light Transmitting Concrete



Комбинации оптических
(стеклянных или полимерных
волокон) и мелкозернистого
бетона.





Luccon®
Lucem®

Translucent Concrete

Светопроницающий бетон



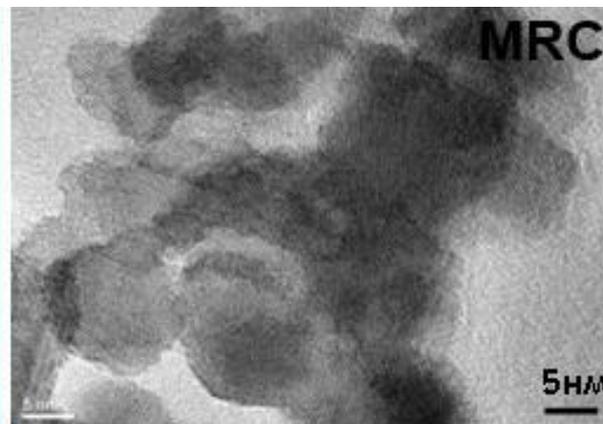
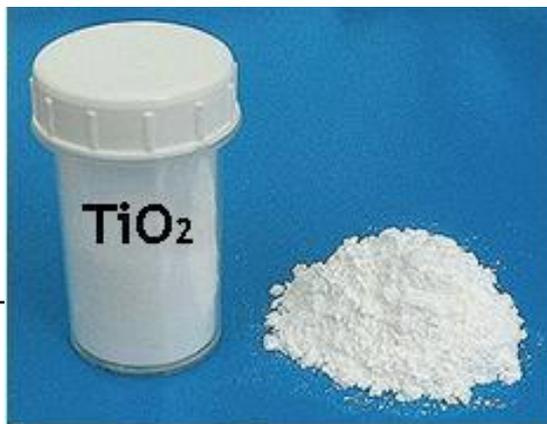
Бетон – без крупного
заполнителя
(мелкозернистый) –
прочность при сжатии
>70 МПа (**НРС**)

Диаметр фиброволокна – 2 мкм-2 мм.
Использование фибры разного диаметра
обеспечивает различные световые
эффекты.

Изготовление блоков и панелей только в
заводских условиях (сборный бетон).

Технология производства:

- послойное формование: слой мелкозернистого бетона - слой фибры (отдельные нити или тканые полотна) – толщина слоя 2-5 мм (световой эффект усиливается с уменьшением толщины чередующихся слоев и увеличения их количества;
- после набора прочности – шлифовка и полировка поверхности (глянцевая);
- разрезка массива на отдельные блоки.



Диоксид титана (TiO_2) – один из основных каталитических компонентов, широко используемый в качестве белого пигмента в красках, пластмассах и множестве др. продуктов. Для того, чтобы он выполнял функцию фотокатализатора, требуется обработка материала для получения высокодисперсных **наноразмерных** частиц с модифицированной атомной структурой в сравнении с обычным пигментом. На нано уровне такой тип титана претерпевает квантовые преобразования и становится полупроводником. Активированный энергией света соответствующей длины волны (солнечный свет), TiO_2 инициирует разделение зарядов электронов и электронных дырок. Электронная дырка реагирует с молекулой воды, а также с гидроксильным радикалом и протоном. Электроны распространяются по поверхности фотокатализатора и реагируют с посторонними веществами (молекула воды и протон), вызывая химические превращения, а также окисление и формирование гидроксильных радикалов, которые действуют как мощные окислители для разложения органических соединений. Эти две реакции составляют основу фотокаталитического процесса.

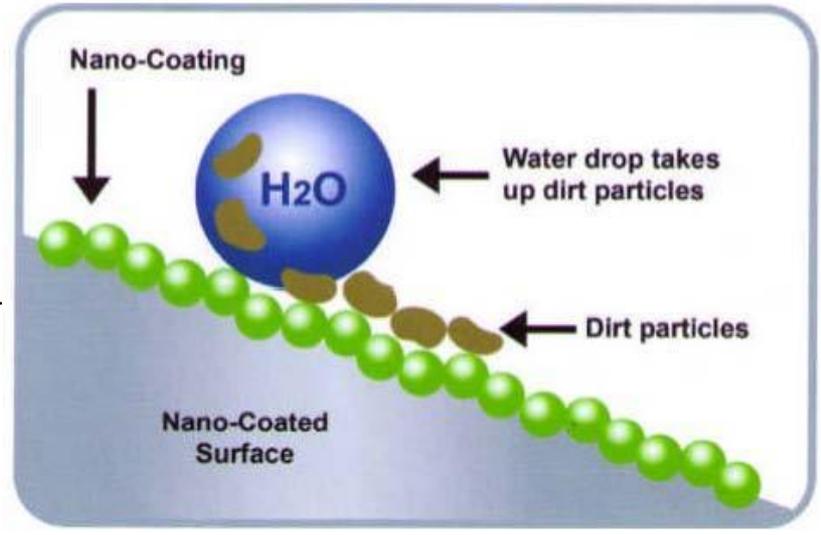
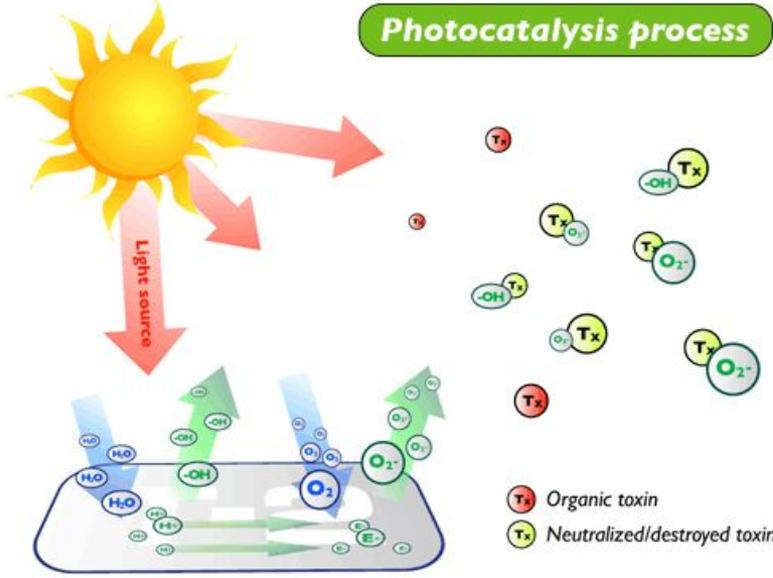
При использовании диоксида титана в структуре бетона процесс самоочищения базируется на двух явлениях: окисление и гидрофилизация.

- **Окисление:** фотокатализаторы разлагают органические материалы, которые загрязняют поверхность. Органические соединения, подвергнутые действию

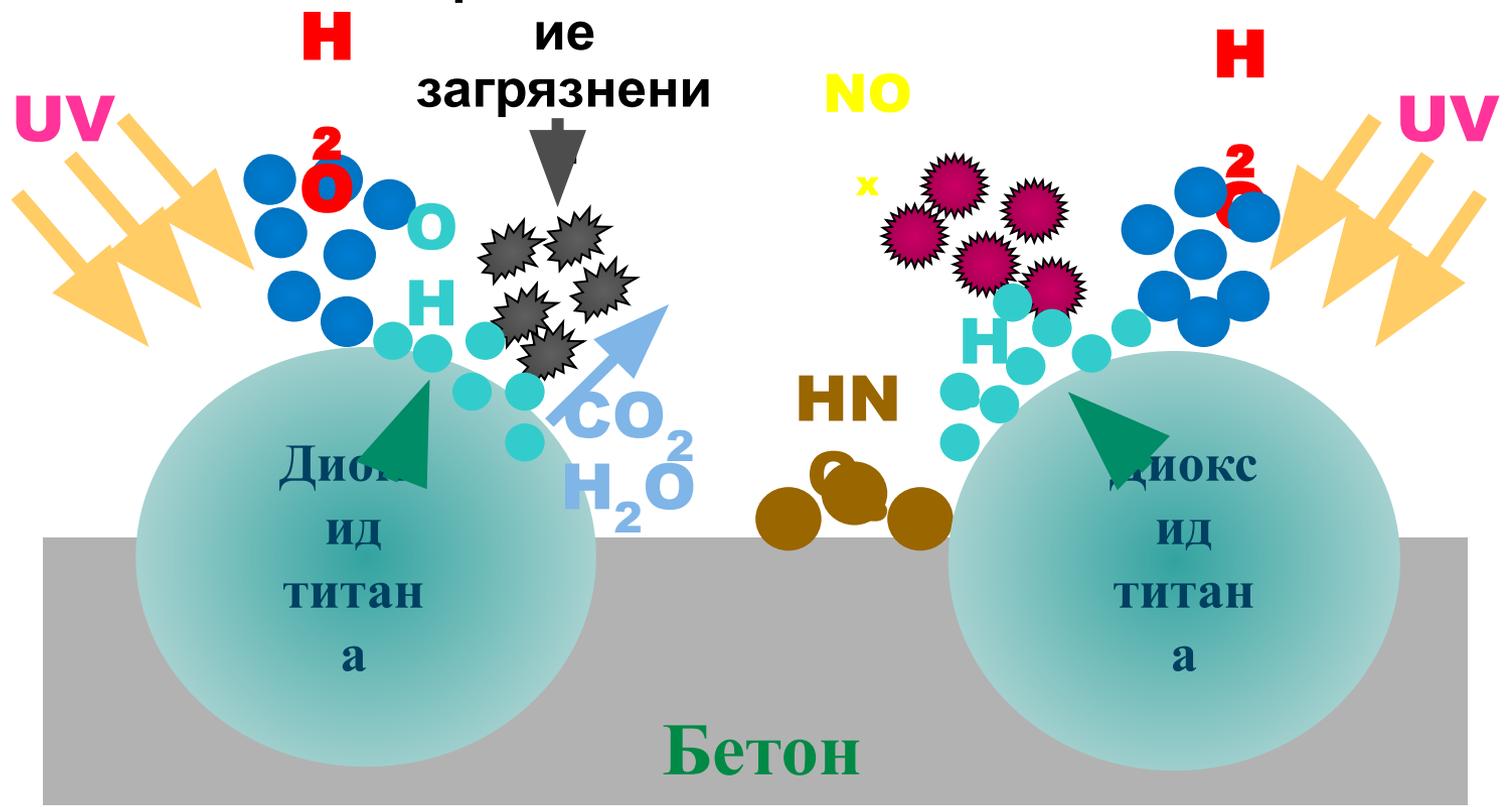


обрабатываемой поверхности, так как поверхность становится гидрофильной. Гидрофильная поверхность предотвращает формирование капель воды, которые могут образовывать пятна, впитывая грязь, а затем загрязнять поверхность. Вместо этого влага образует тонкую пленку по всей поверхности, что препятствует адгезии грязи. Дождь или обычный полив легко удаляет грязь. Результат: здания или сооружения остаются более чистыми и красивыми.

Photocatalysis process



и ческ
ие
загрязнени



Бетон

Спасибо за внимание!

