

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



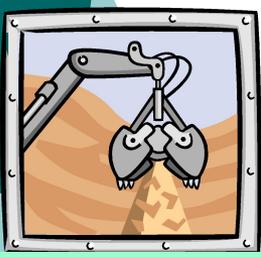
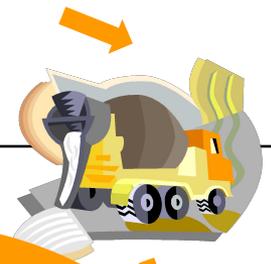
- **Оптимизация существующих способов производства:**
- оптимизация технологических процессов
- Оптимизация энергопотребления
- оптимизация формы и армирования элементов – уменьшение материалоемкости
- Оптимизация технологии строительного производства



Минеральные добавки

Природные  
Заполнители, вода  
ресурсы

Производство  
цемента



Не  
возобновляемые  
ресурсы

Переработка

Жизненный  
цикл



Использование  
вторичных  
ресурсов

Повторное  
использование



Снос



Проект

Классификация



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.

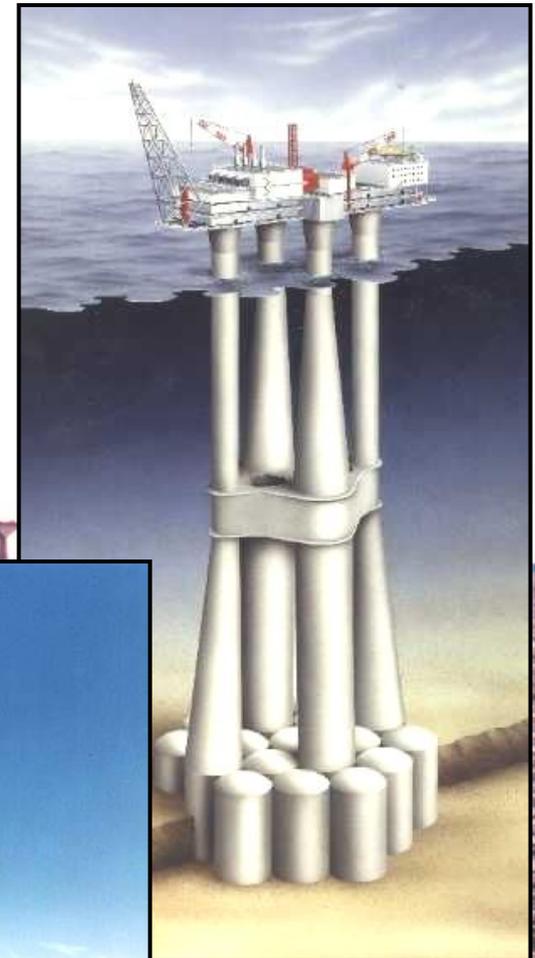
**Долговечность (прочность)** бетона, как строительного материала, является одним из основных условий достижения целей устойчивого развития, связанных с минимизацией отрицательного воздействия строительных конструкций на окружающую среду.

# 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**

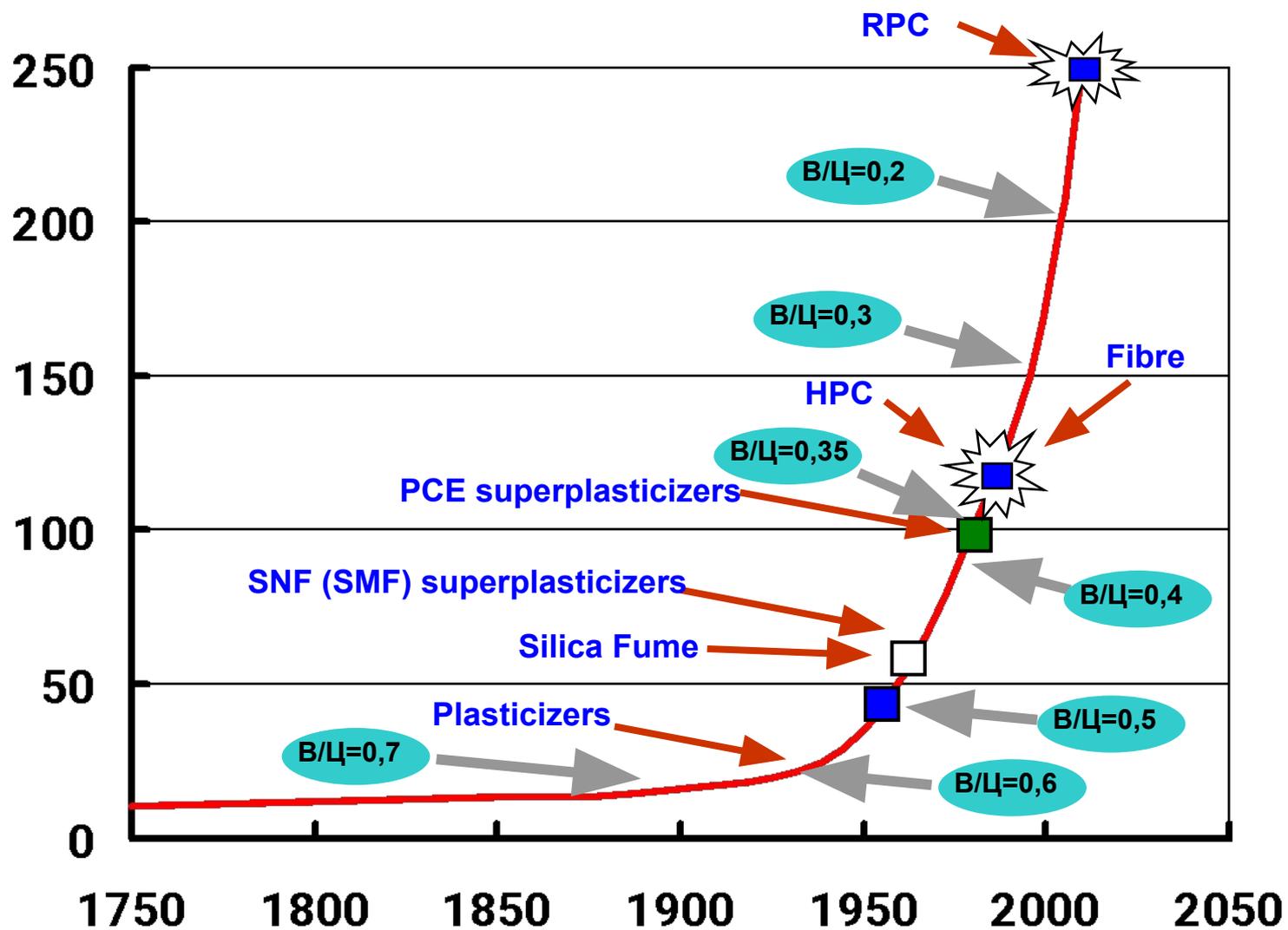
## **Концепция HPC**

**- 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;**

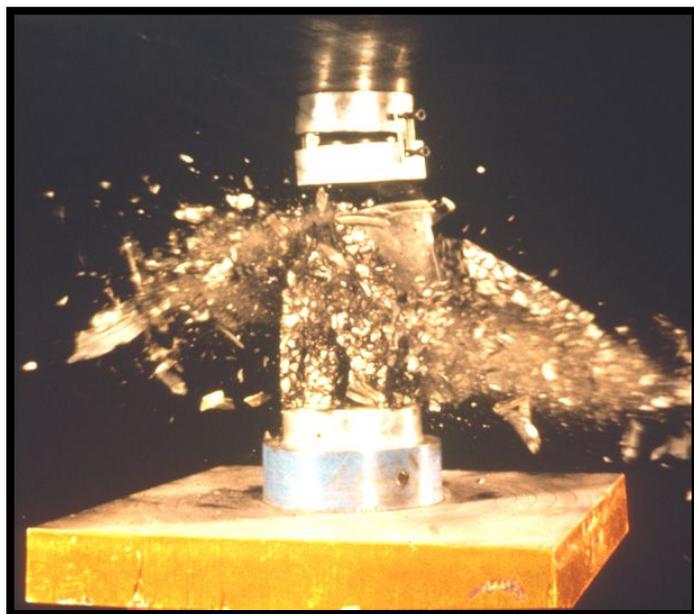
**- использование существующей производственной базы, доступных материалов и ресурсосберегающих технологий производства бетонных смесей, изготовления из них бетонных и железобетонных изделий и конструкций с широким диапазоном свойств.**

# Развитие прочности бетона

Прочность при сжатии, МПа



# High Strength Concretes (HSC) – высокопрочные бетоны

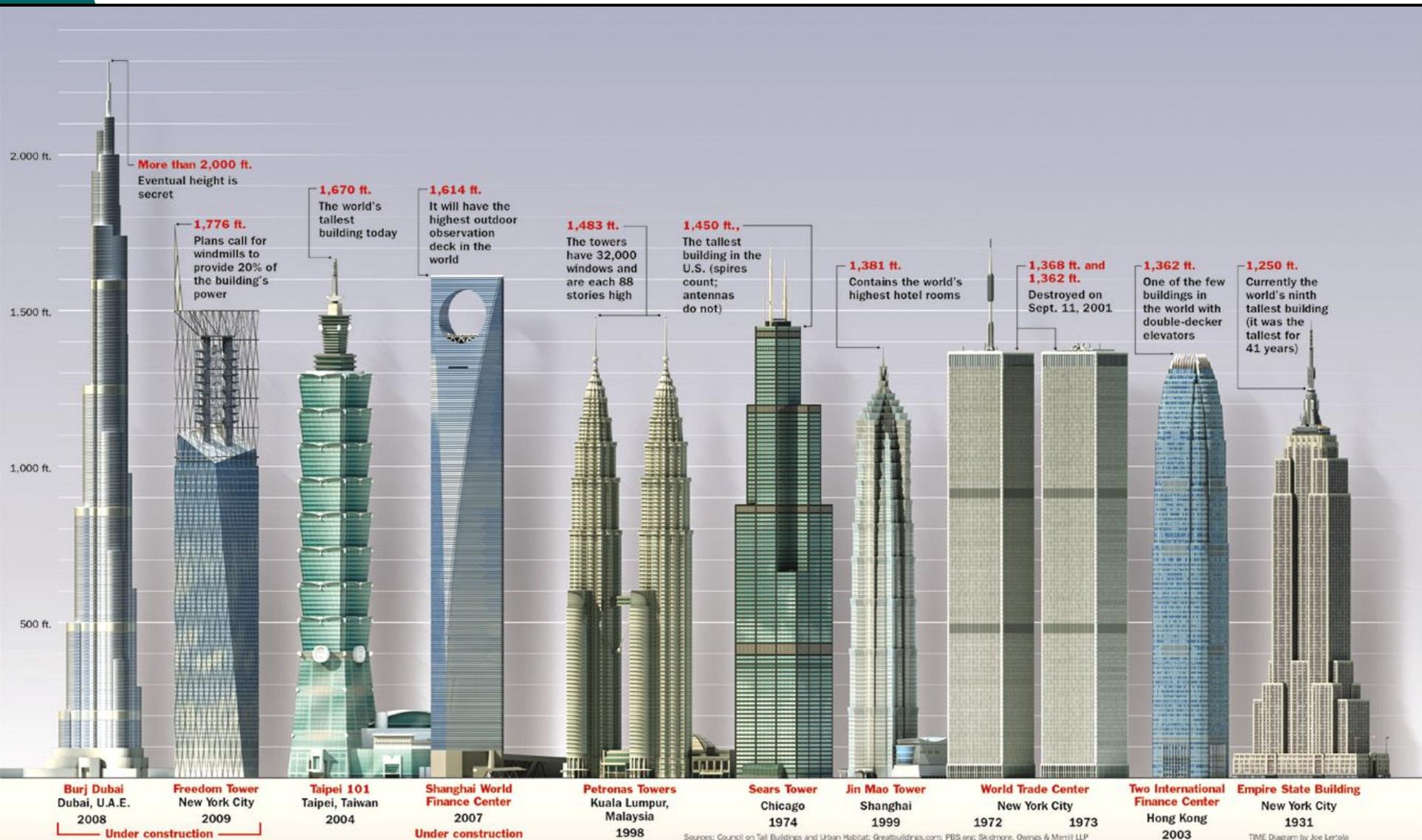


Максимальный класс бетона по прочности при сжатии:

- \* 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



Sources: Council on Tall Buildings and Urban Habitat; Greatbuildings.com; PBS.org; Skidmore, Owings & Merrill LLP

TIME Diagram by Joe Lertola

# **High Strength Concretes (HSC) – высокопрочные бетоны**



## **Petronas Tower Kuala Lumpur**

- высота 452 м;
- бетон C60/75-C80/95;
- В/Ц=0,27.



## **ММДЦ «Москва- Сити»:**

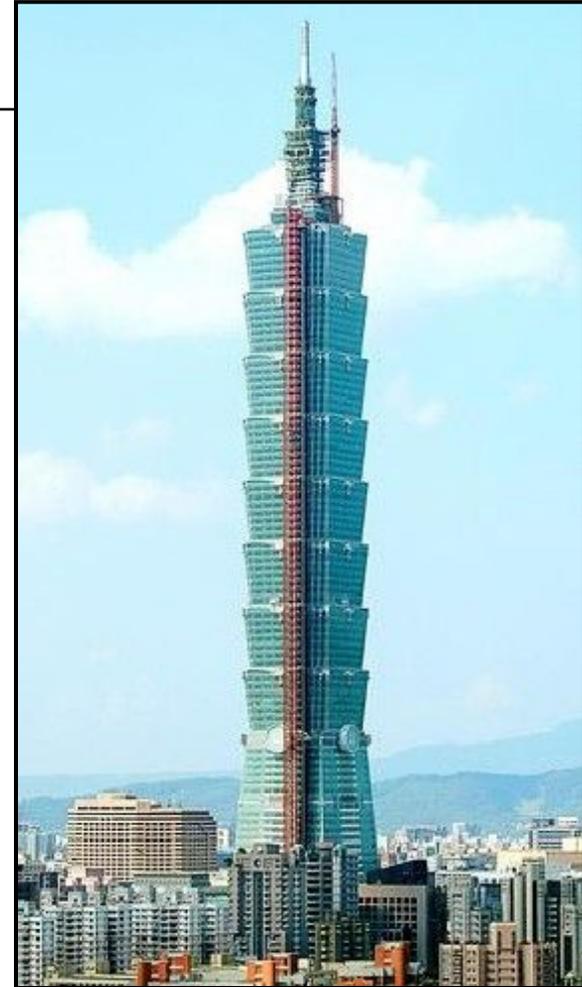
- бетон В80-В90;
- В/Ц=0,24-0,28
- ОК=18-22 см.

## 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)

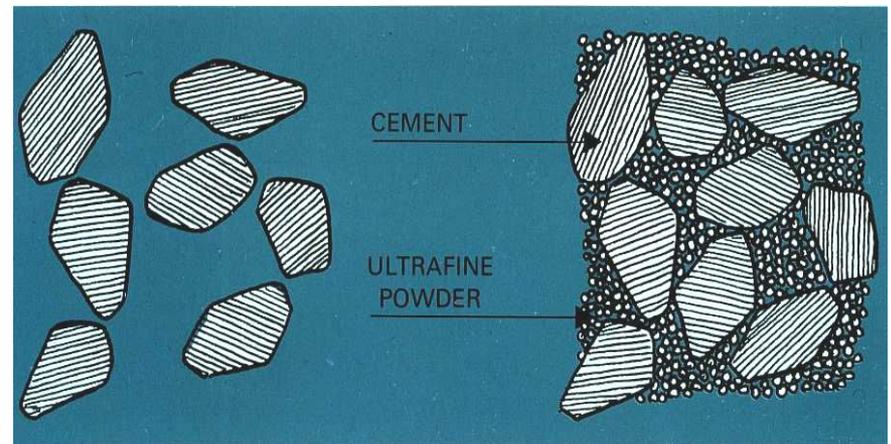
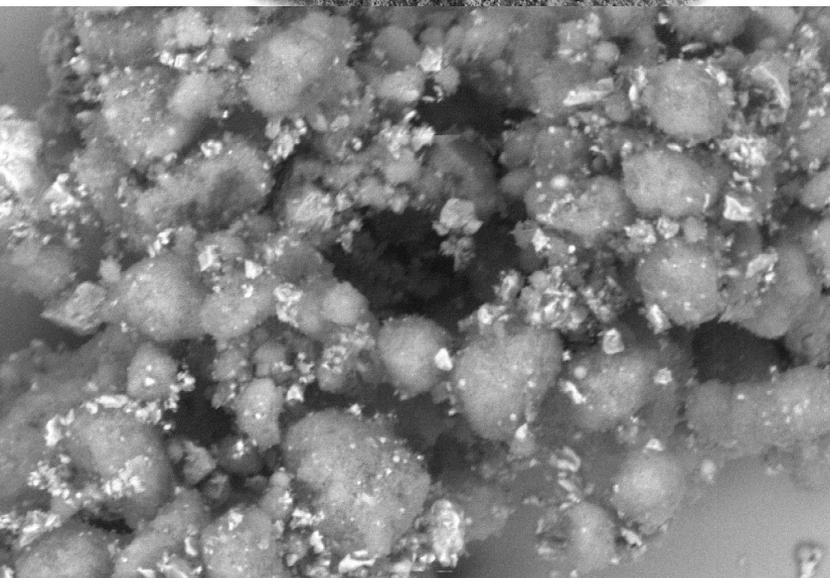
Средний размер частиц < 1 μm;

Насыпная плотность 130-430 кг/м<sup>3</sup>;

Истинная плотность 2.2 г/см<sup>3</sup>;

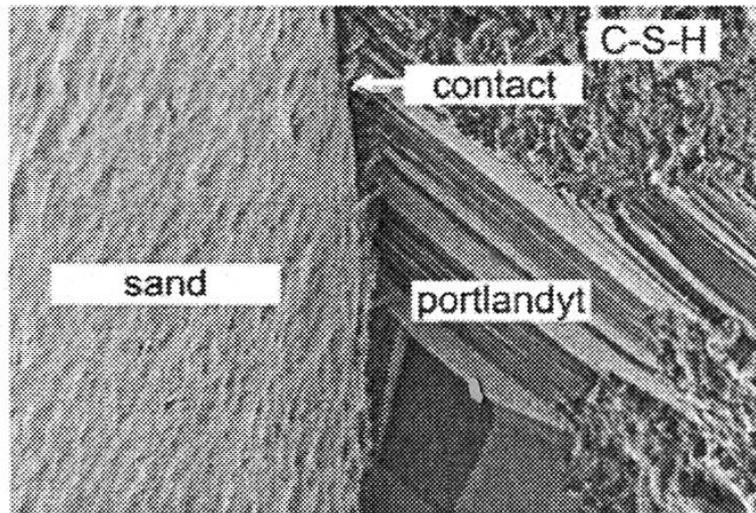
Удельная поверхность (БЕТ) 13000- 30000 м<sup>2</sup>/кг;

Содержание аморфного оксида кремния 80-90 %.

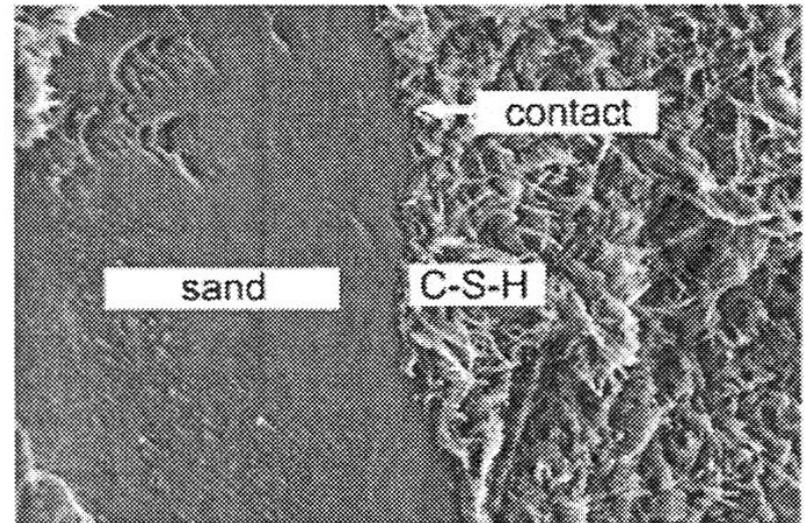


# Влияние пуццолановых добавок (микрокремнезем)

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).

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

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);

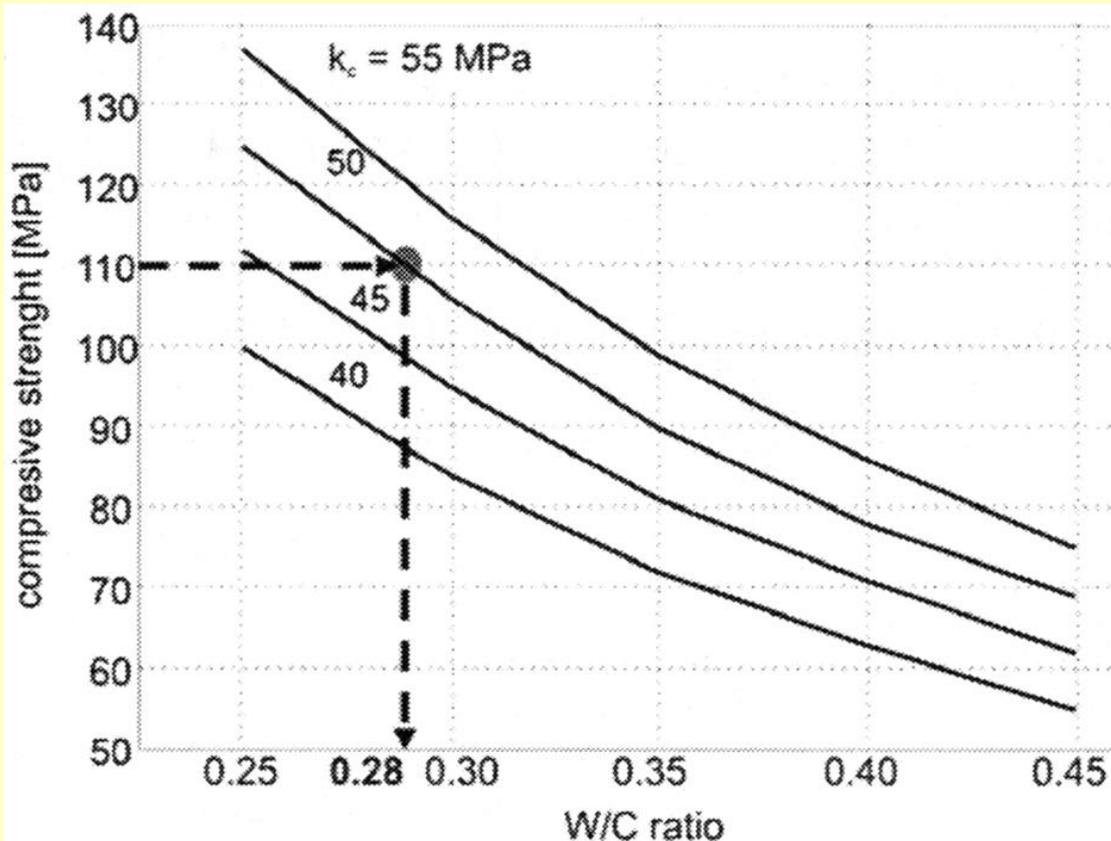
$k_C$  – активность цемента, МПа;

$W/C$  – 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/м<sup>3</sup>];  
 $\rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{п}}, \rho_{\text{щ}}, \rho_{\text{МК}}, \rho_{\text{д}}$  – плотность [кг/дм<sup>3</sup>].



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

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

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

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

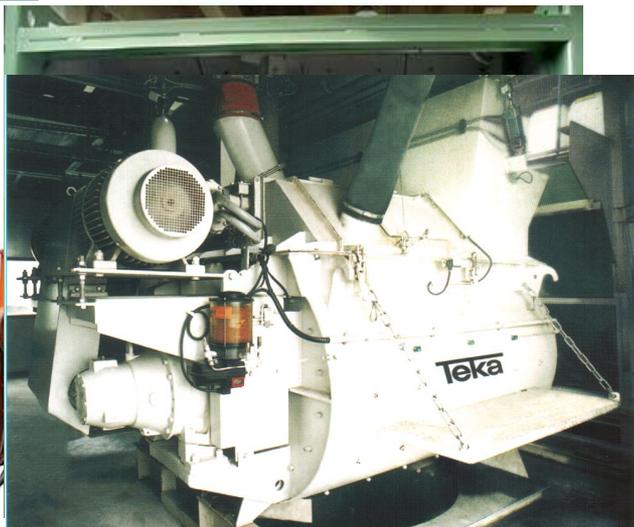
$$V_3 = 1000 - V_{\text{ц}}$$

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

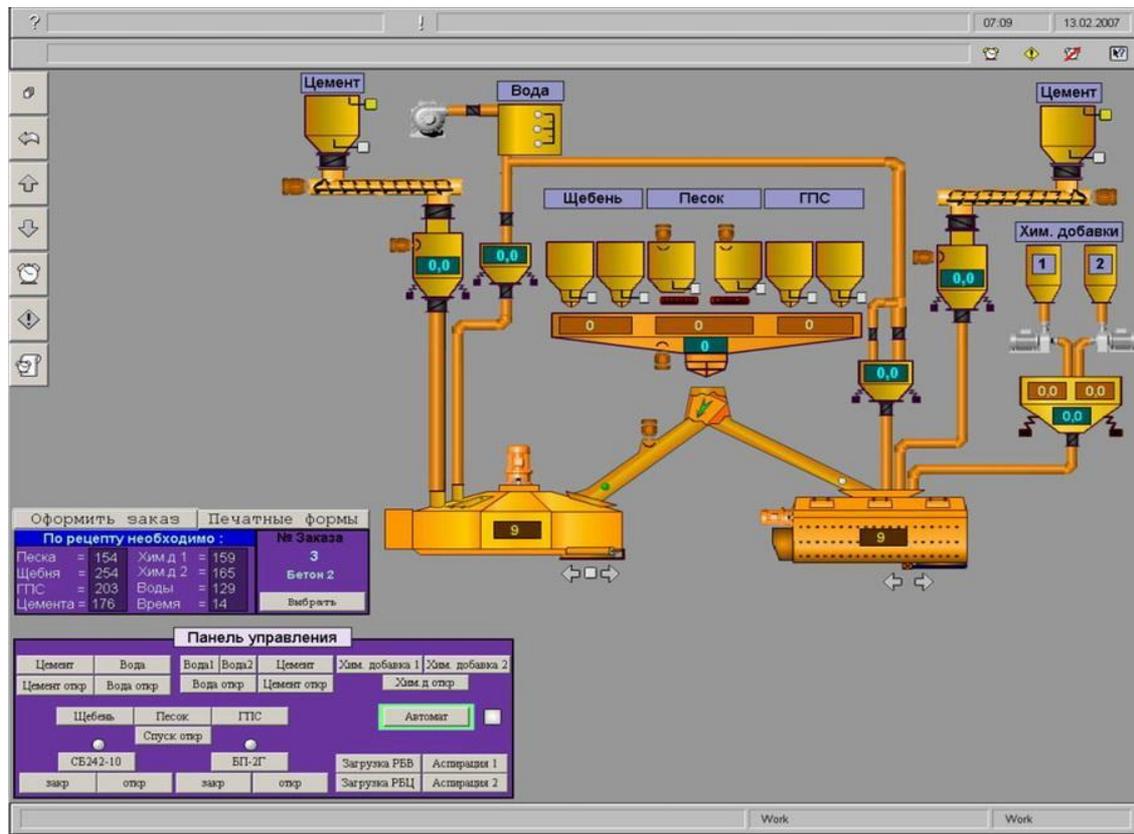
- Портландцемент            398 кг/м<sup>3</sup>
- Зола-унос:                45 кг/м<sup>3</sup>
- Микрокремнезем:        32 кг/м<sup>3</sup>
- В/Ц:                        0.30
- Пластификатор:                1.7 л/м<sup>3</sup>
- HRWR (СП):                15.7 л/м<sup>3</sup>
- Прочность при сжатии (91 сут.)                60 МПа



# Перемешивание бетонной смеси, транспортирование, укладка и уплотнение

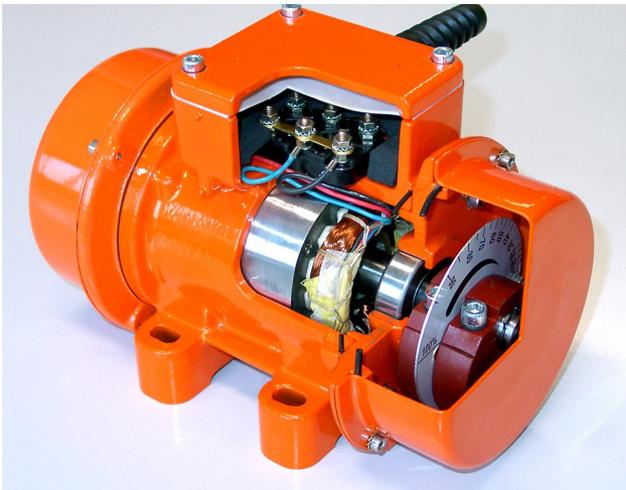


Перемешивание в бетоносмесителях принудительного действия.  
Длительность – не менее 6 минут.





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

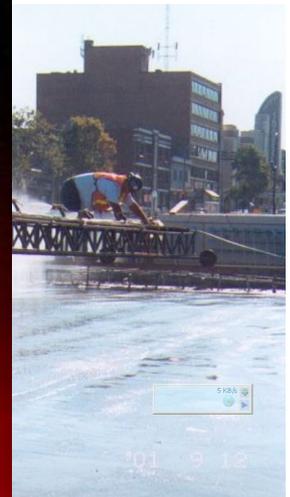
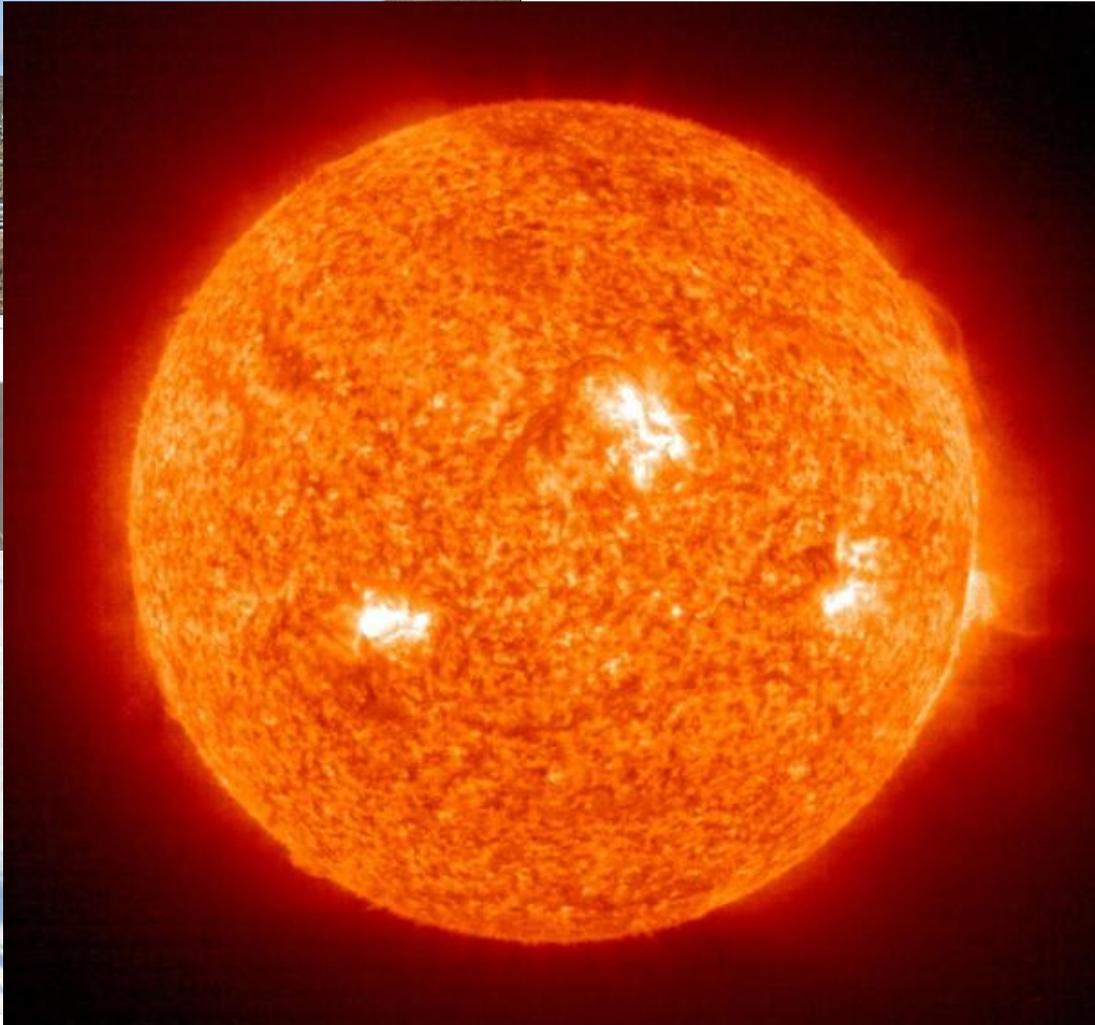
### Внутренний безводный уход

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

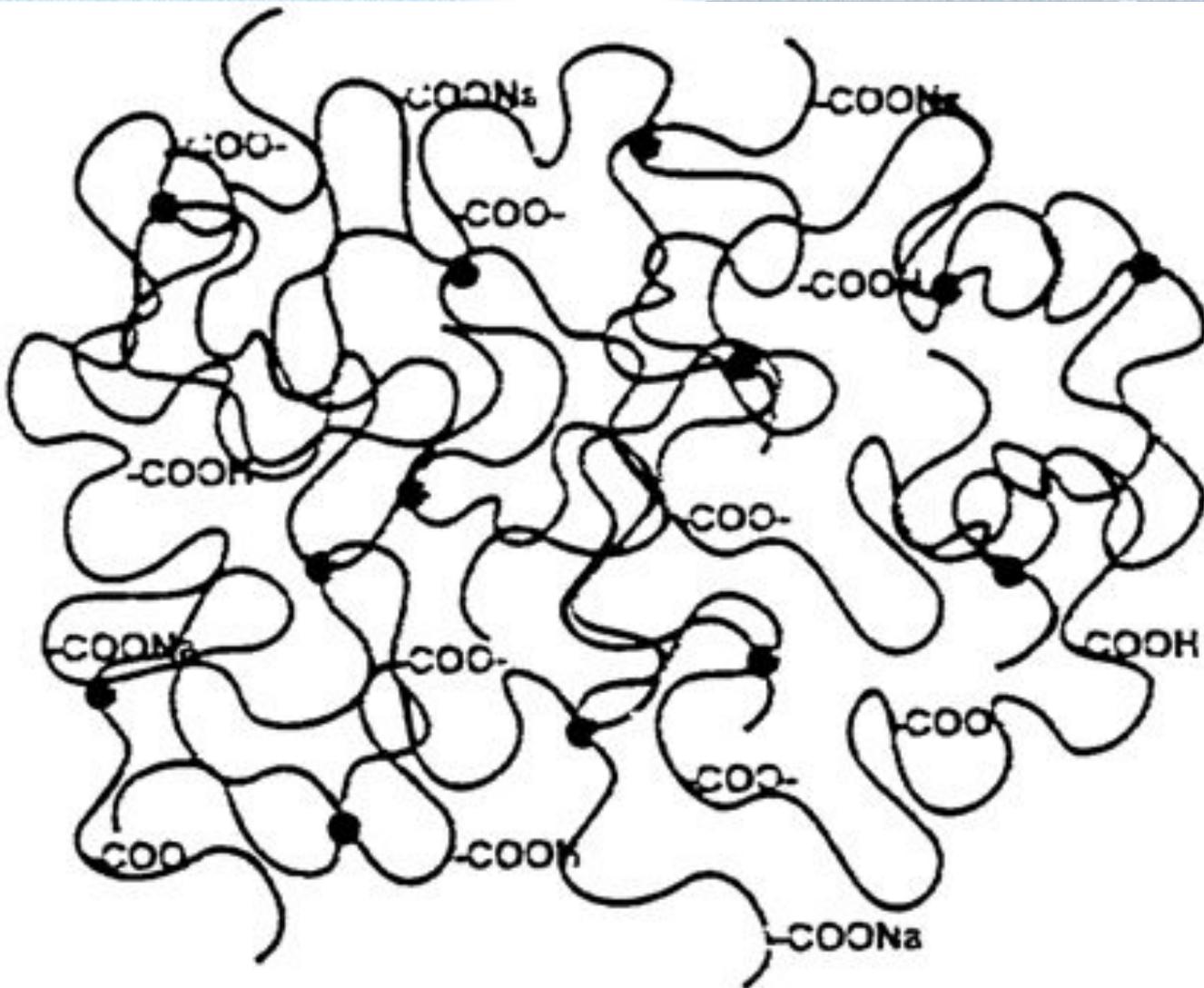
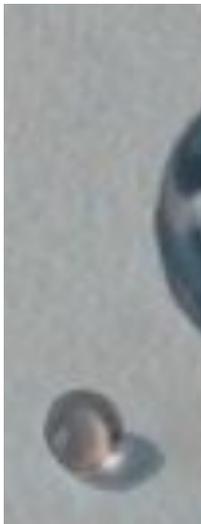


Шлак  
ферросплавов



# Внутренний уход за бетоном

## Superabsorbent polymers (SAP)



# **Ultra High Strength Concretes (UHSC) – особо высокопрочные бетоны**



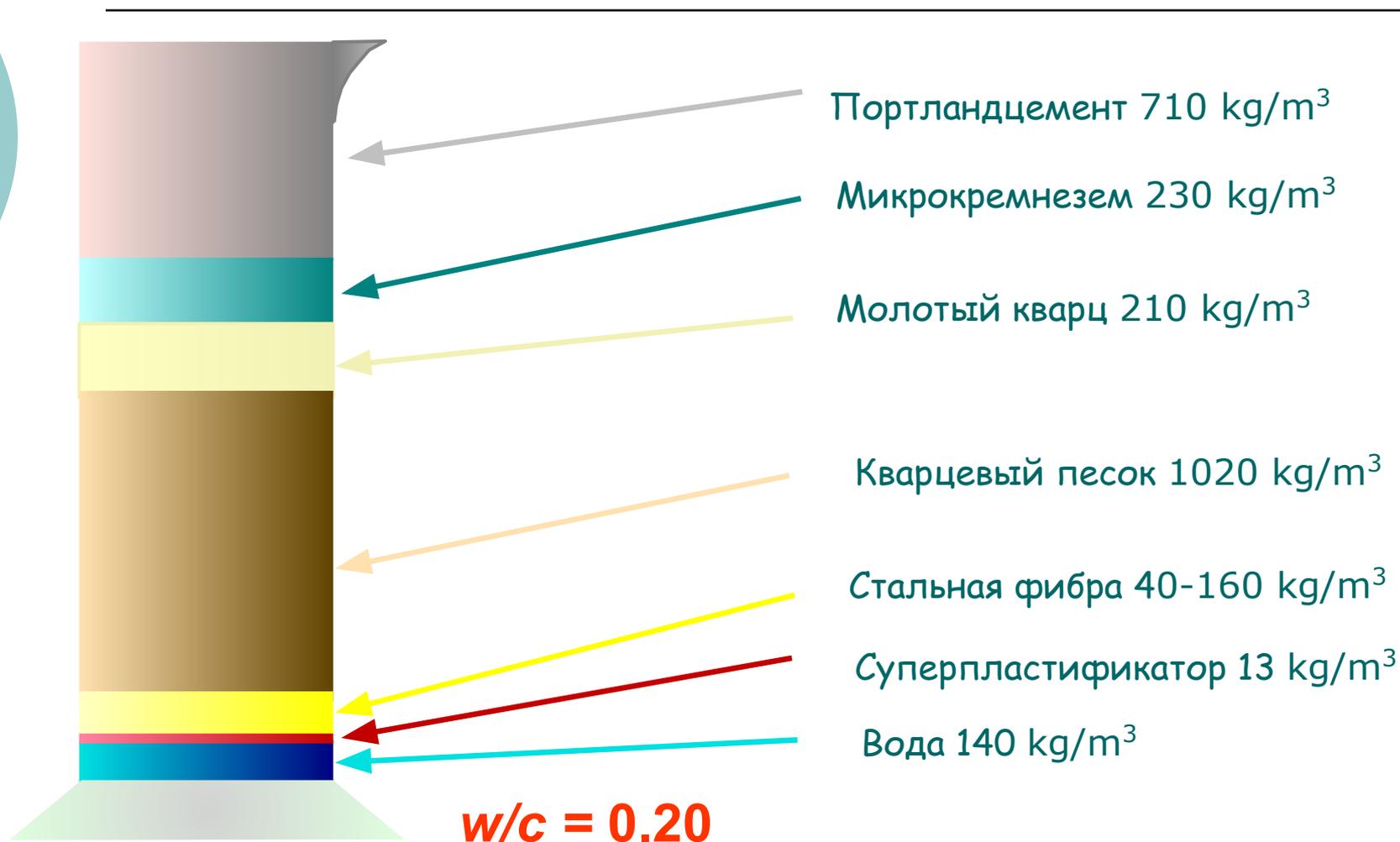
## **Reactive Powder Concretes (RPC) – реакционные порошковые бетоны**

- 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/м<sup>2</sup>;
- Модуль упругости: до 60 ГПа;
- Средняя плотность: 2500-3000 кг/м<sup>3</sup>

### 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



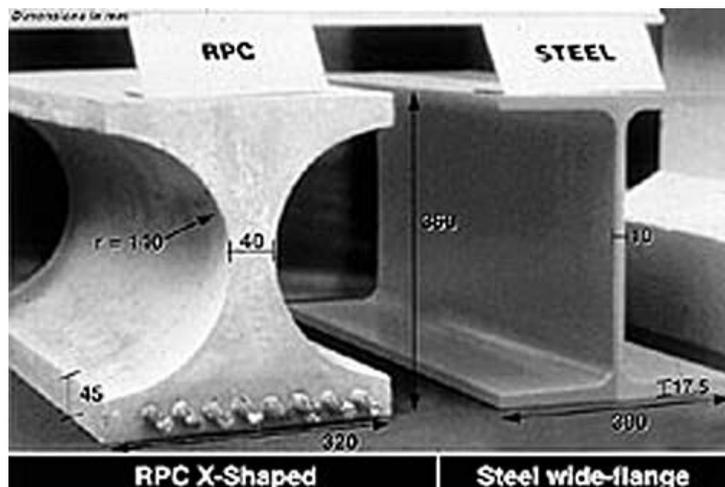
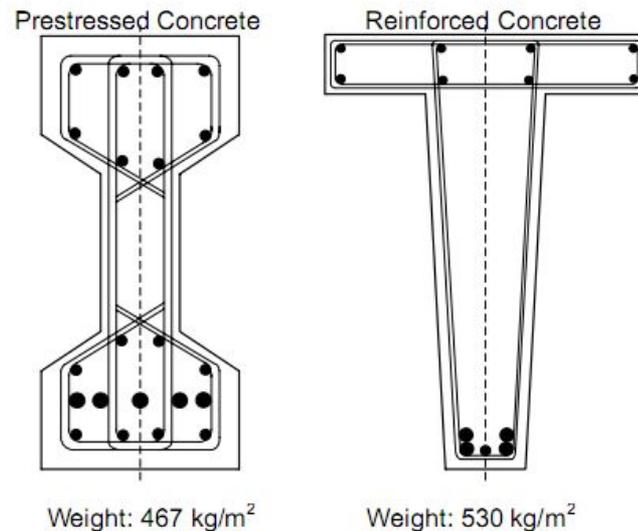
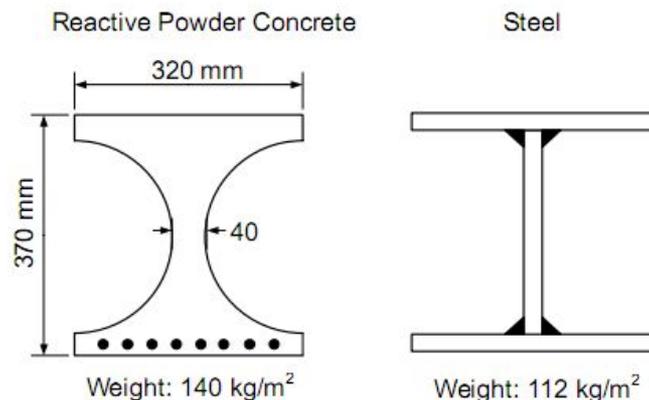
# Области рационального применения RPC

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

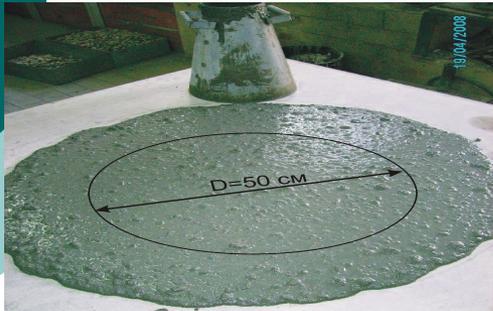


# *Self Compacting Concretes (SCC)* – самоуплотняющиеся бетоны



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.

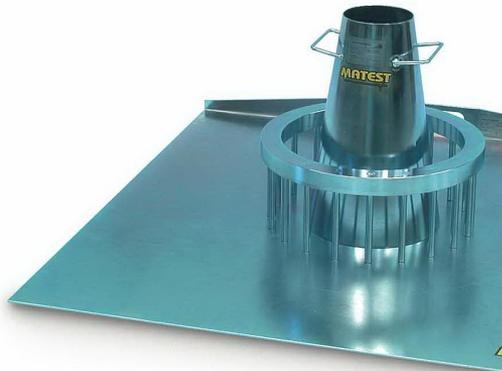
# Методы определения подвижности смесей



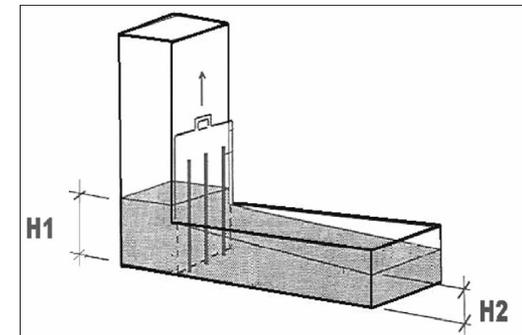
Slump flow – Abrams cone  
650 – 800 mm



V Funnel  
8-12 s

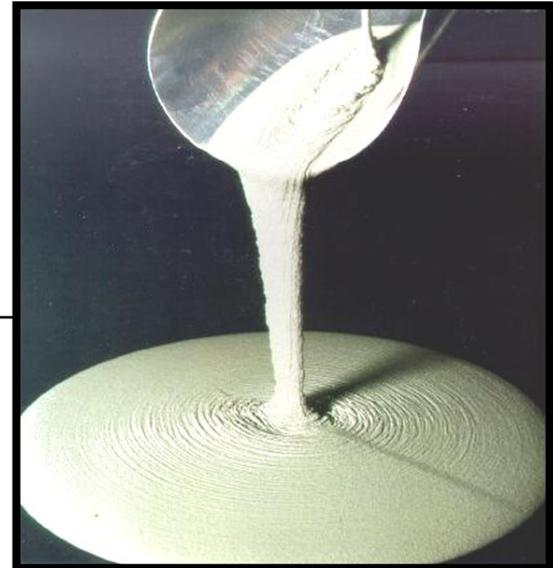


J Ring  
0 – 10 mm

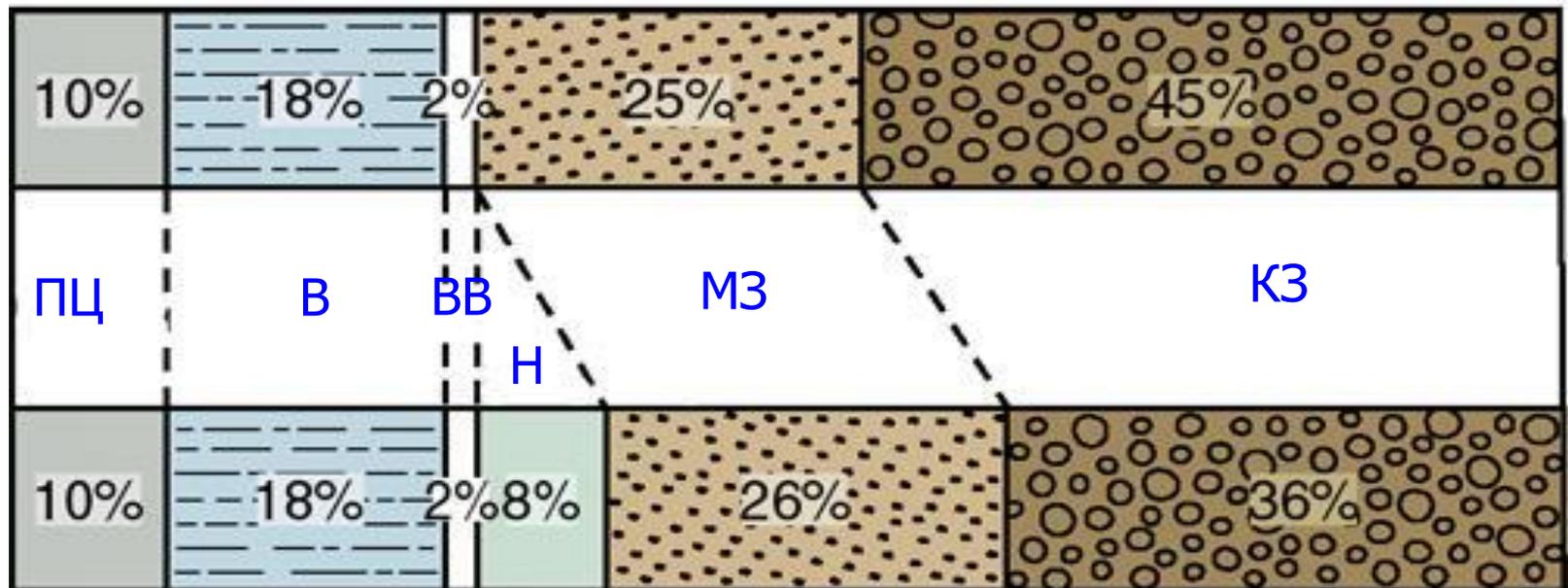


L Box  
 $H_2 / H_1 = 0,8-1,0$

# Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны - состав

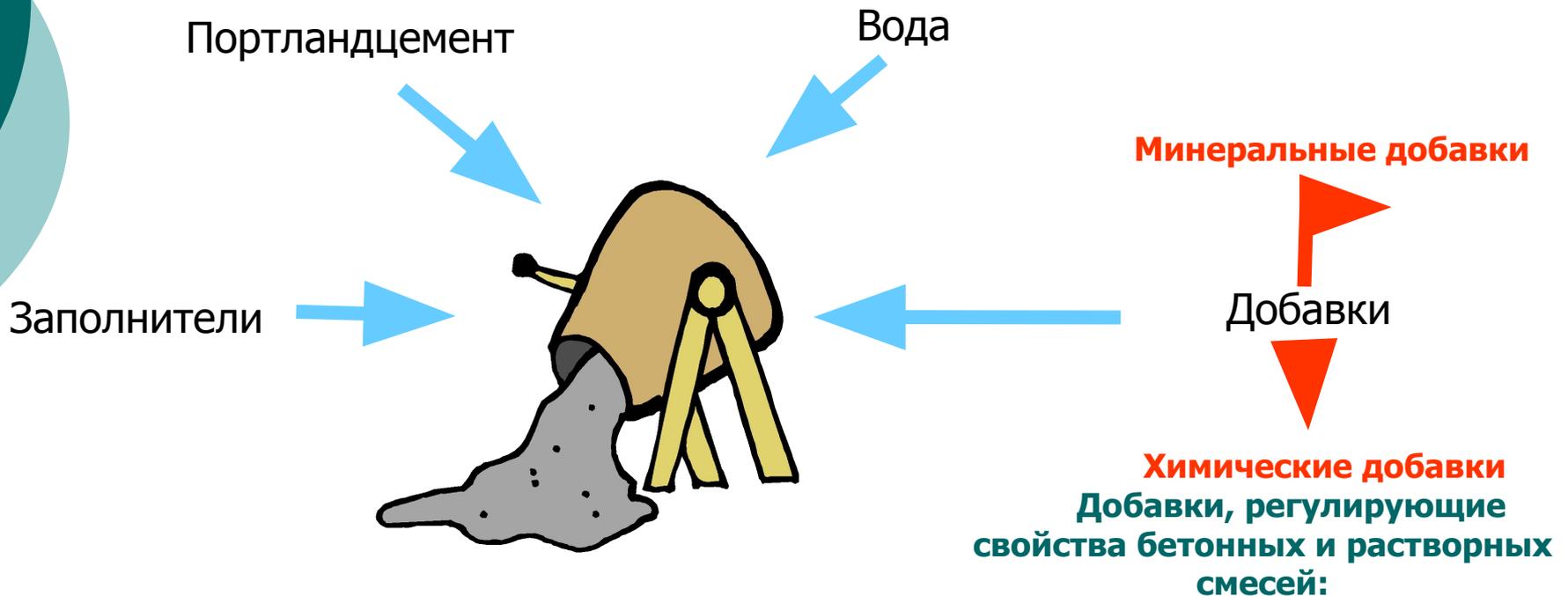


## Обычная бетонная смесь



**SCC**

# Состав бетонной смеси



## Бетонная смесь

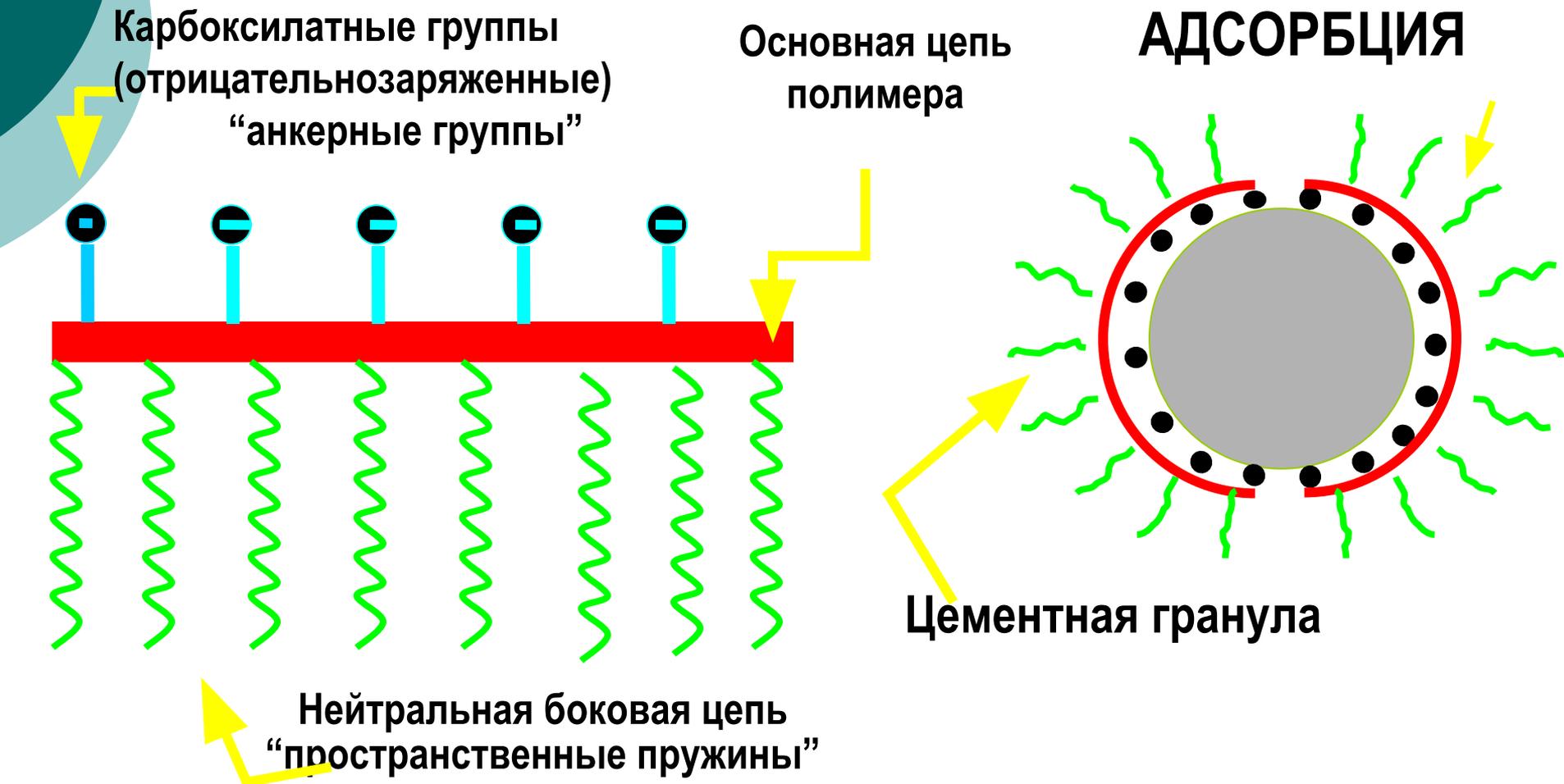
- а) пластифицирующие;
- б) стабилизирующие;
- в) водоудерживающие;
- г) улучшающие перекачиваемость;
- д) регулирующие сохраняемость бетонных смесей;
- е) замедляющие схватывание;
- ж) ускоряющие схватывание;

# ***Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны***

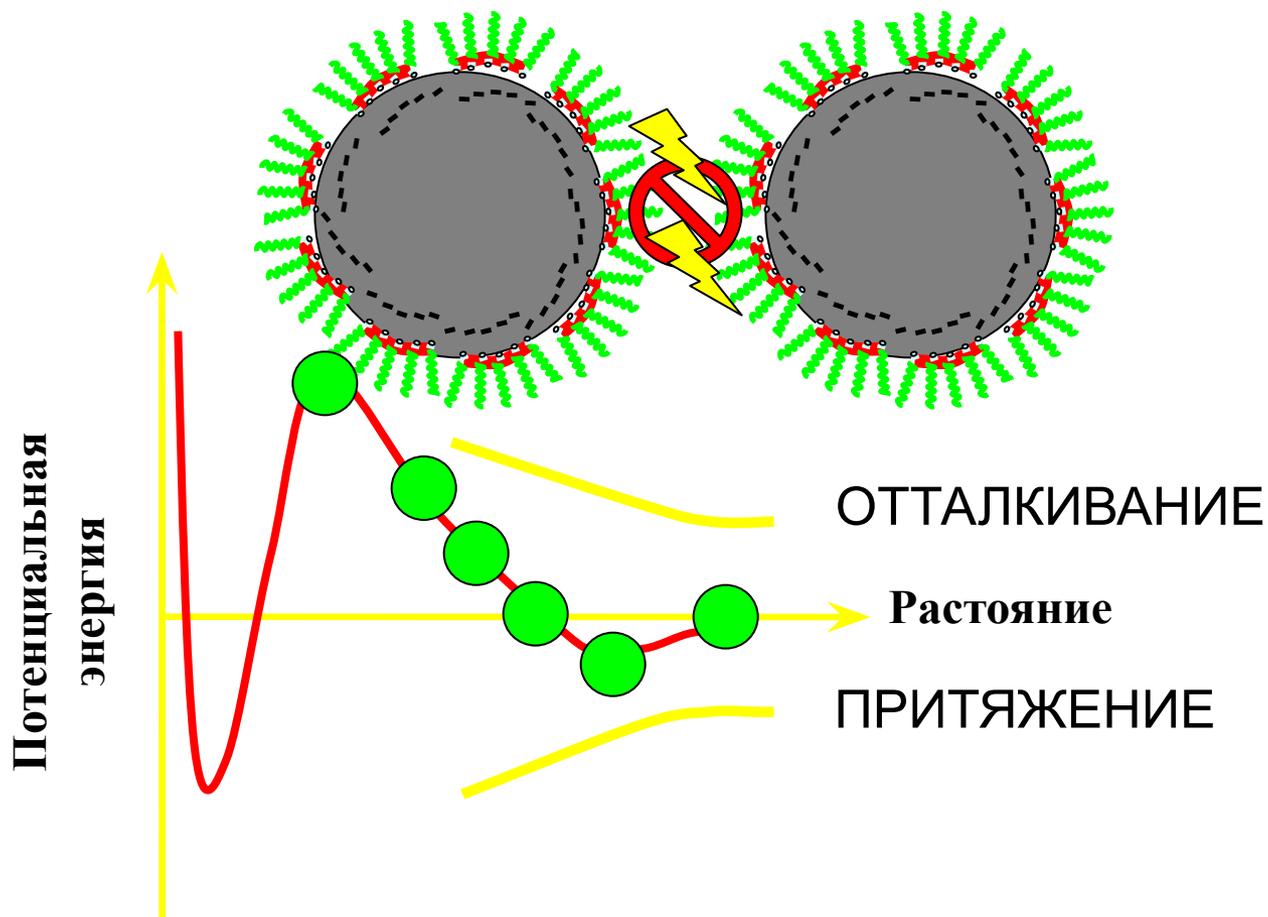


# МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

## 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

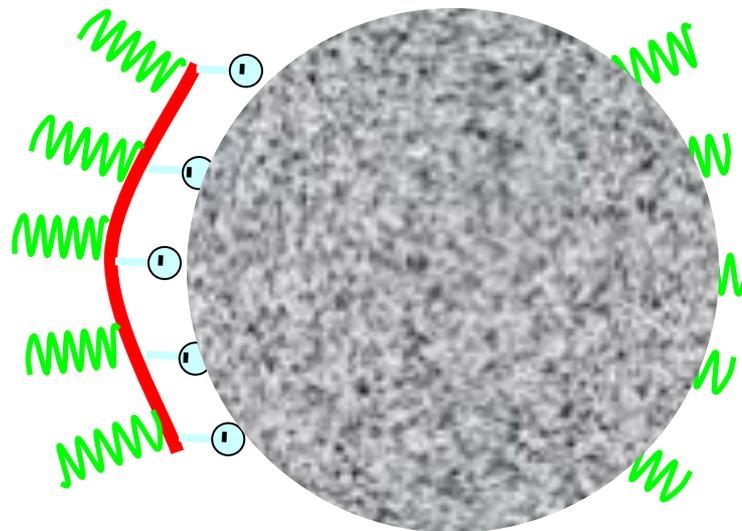
НИЗКАЯ ВЯЗКОСТЬ



# Сохранение удобоукладываемости контролируется уровнем адсорбции полимера

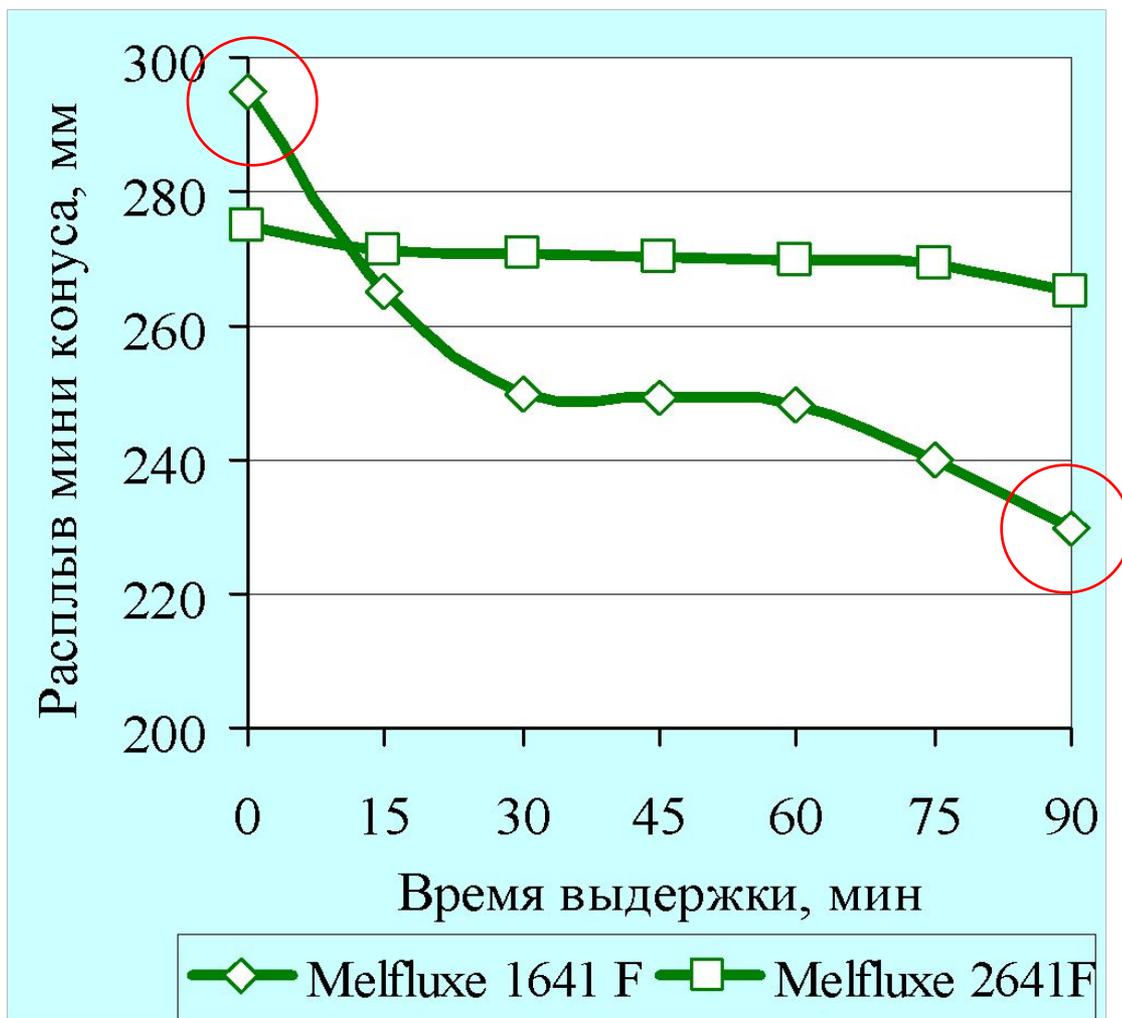
---

МЕДЛЕННО



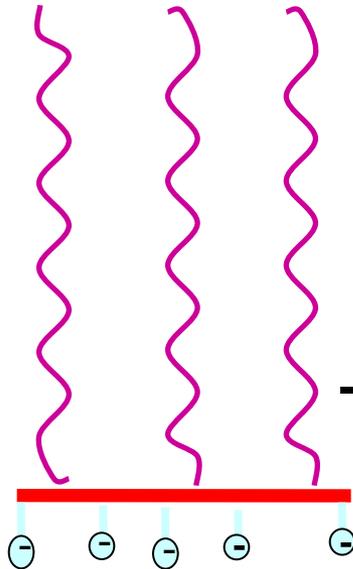
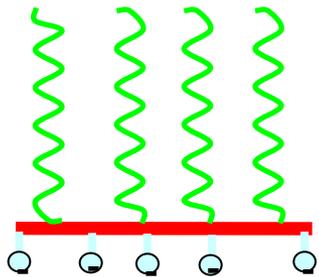
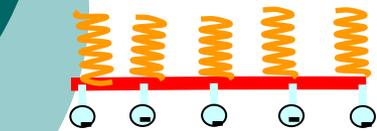
БЫСТРО

## Зависимость подвижности цементных паст от времени выдержки



## Ключевые отличия полимеров:

---

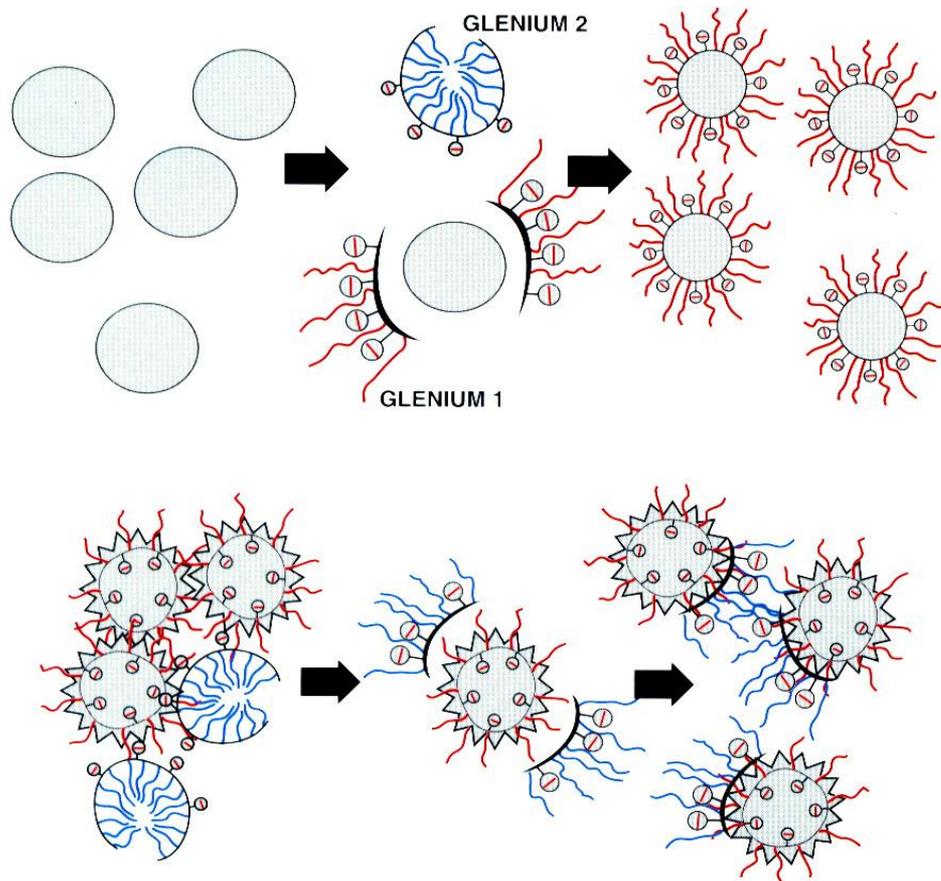


-длина основной цепи;

-длина боковой цепи;

-плотность заряда основной цепи

# Сохранение удобоукладываемости контролируется уровнем адсорбции полимера

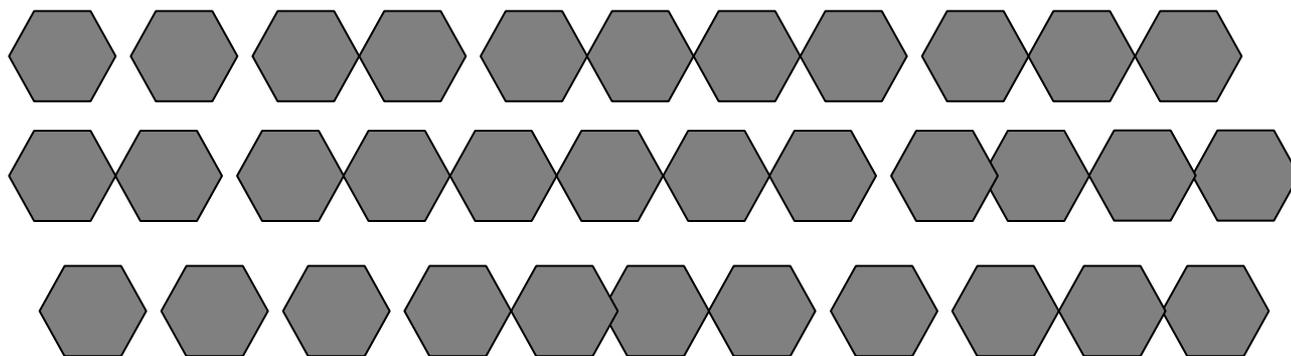
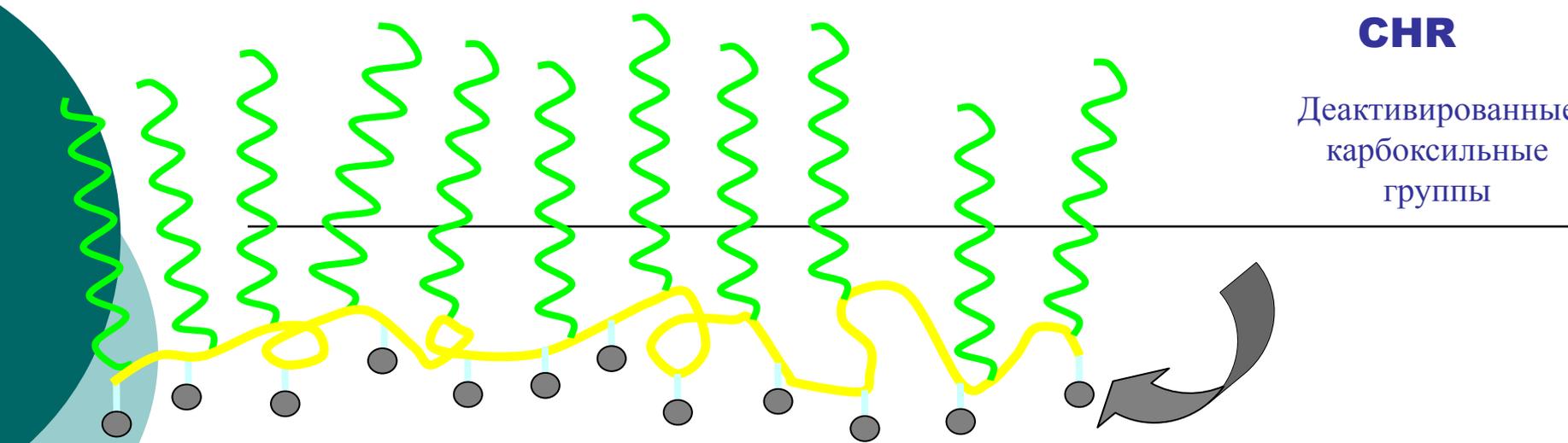


**GLENIUM ACE 30 (FM)** - добавка в технологии сборного железобетона при производстве конструкций, в т.ч. предварительно напряженных из быстротвердеющего бетона. GLENIUM ACE 30 (FM) позволяет получить бетонные смеси с высокой начальной подвижностью (**быстрая адсорбция молекул на цементных частицах**)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

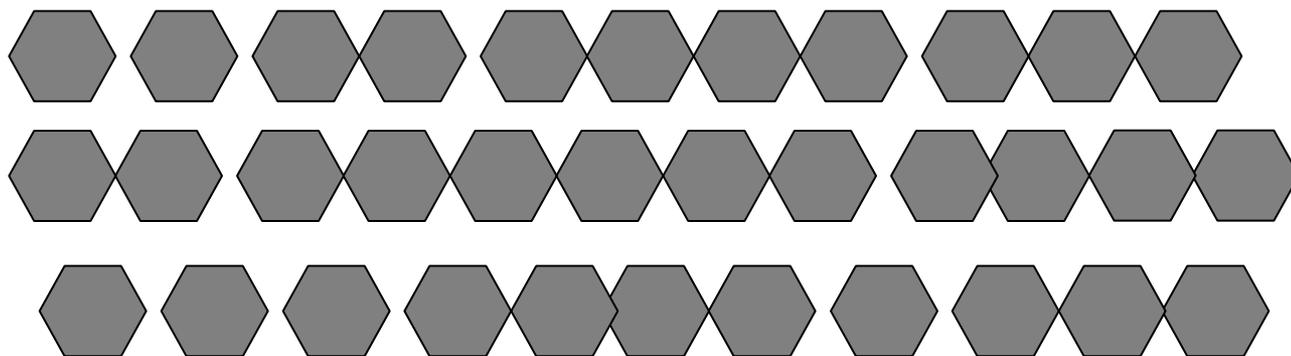
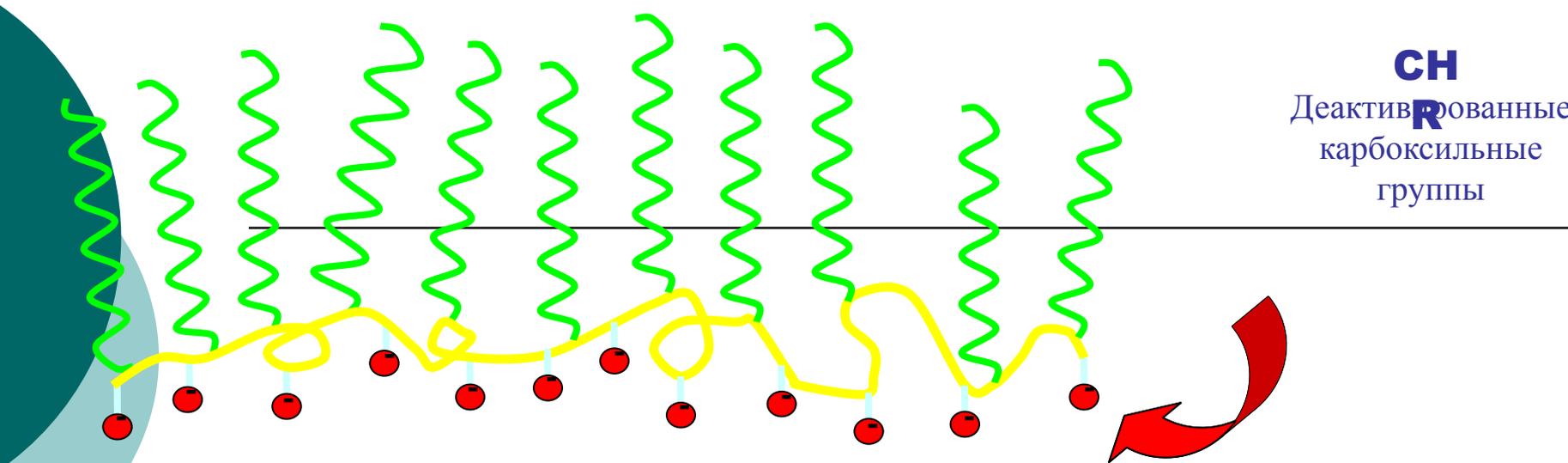
**GLENIUM SKY 505 (FM)/(BV)** – добавка в технологии товарного бетона, позволяет производить высококачественные бетоны из литых бетонных смесей с длительным сохранением подвижности (**медленная адсорбция молекул на частицах цемента**).

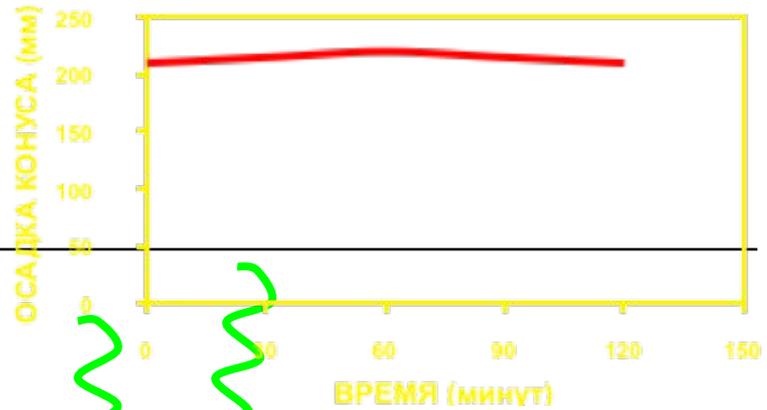
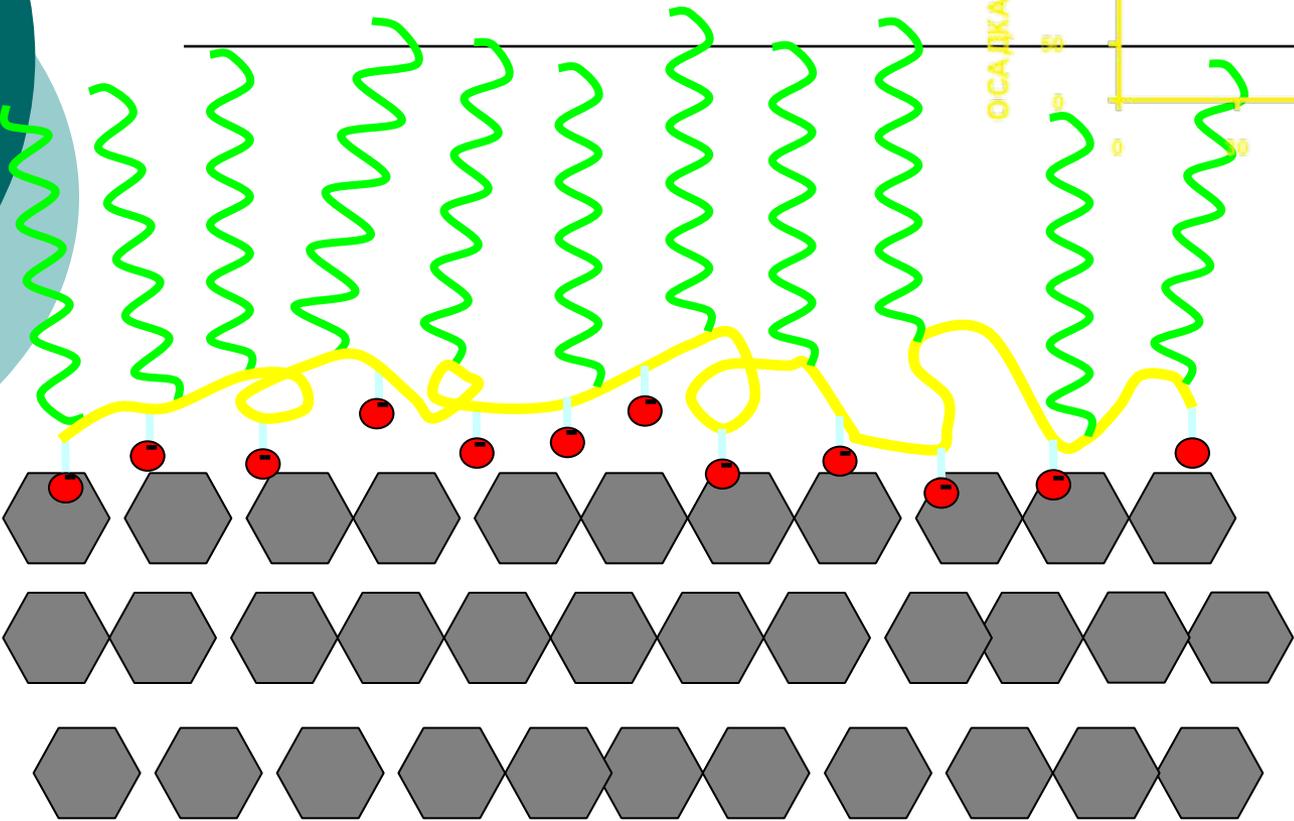
# CHR

Деактивированные  
карбоксильные  
группы

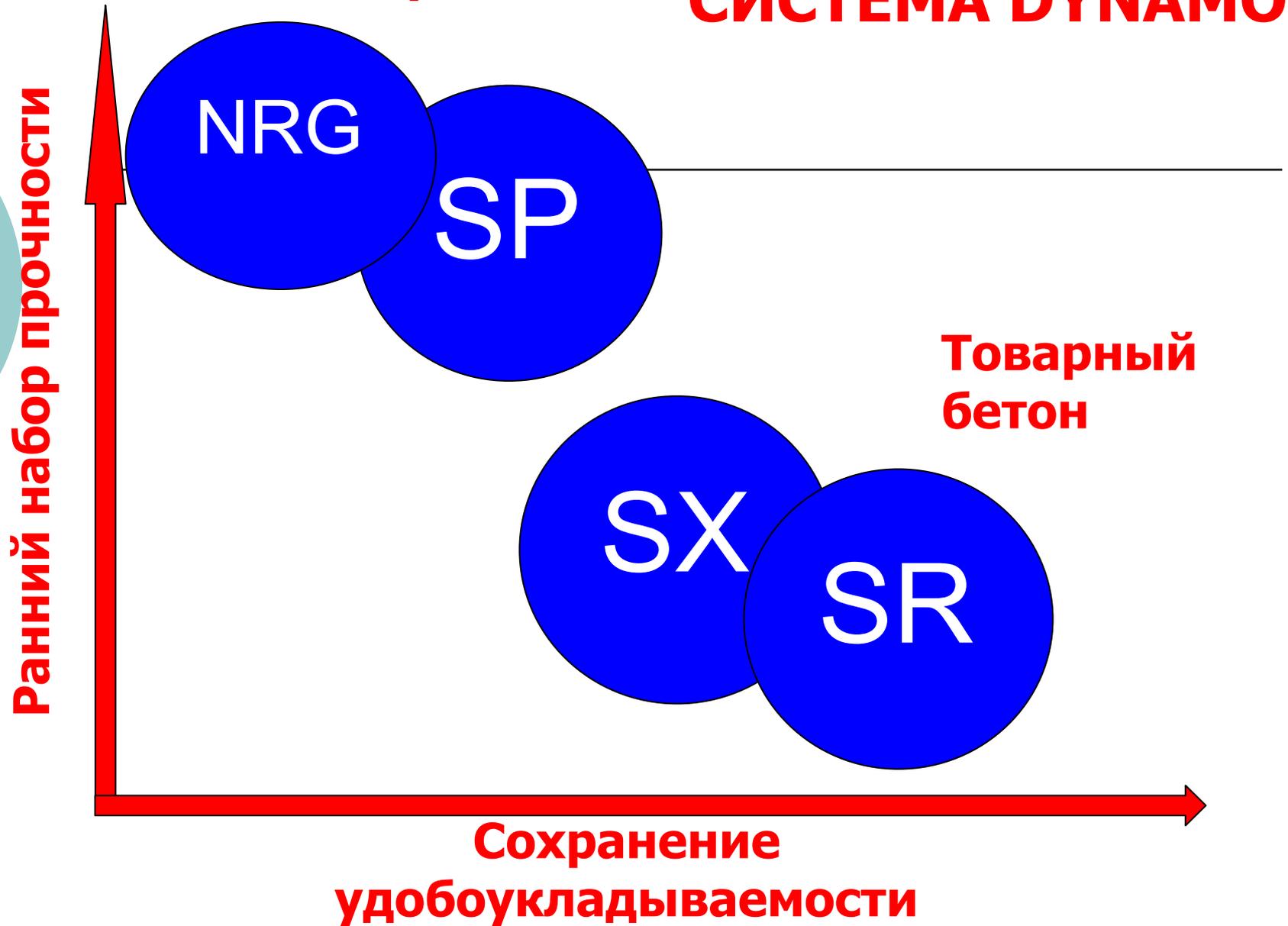


**СН**  
Деактивированные  
карбоксильные  
группы





# Сборный Ж/Б СИСТЕМА DYNAMON

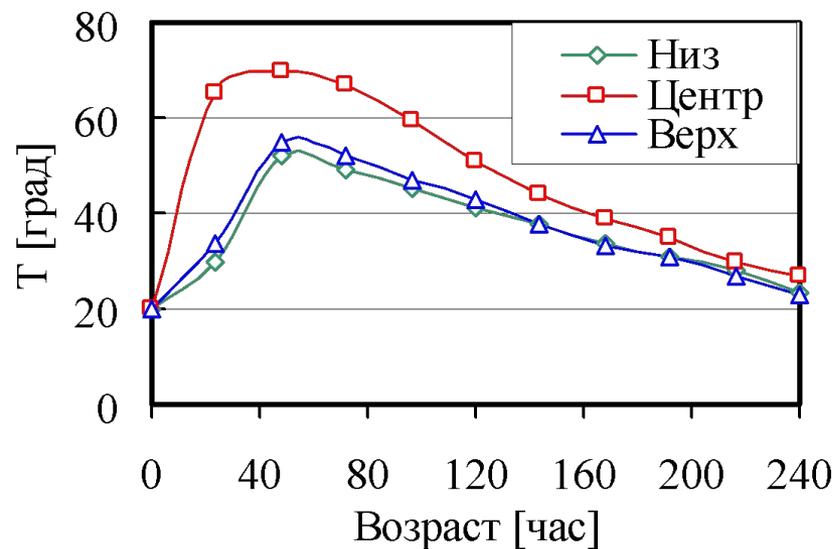


# Бетон с высоким содержанием золы-уноса (High Volume Fly-ash Concrete)

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/м<sup>3</sup>;
- расход цемента – менее 200 кг/м<sup>3</sup>;
- 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.

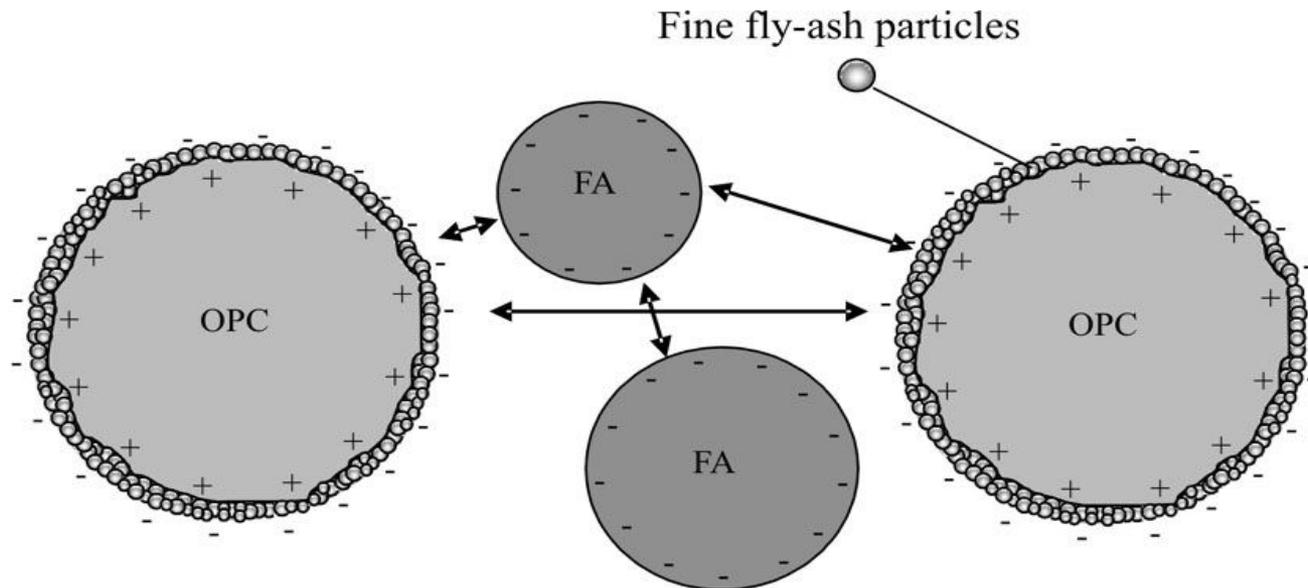
Высокопрочный бетон с большим содержанием золы-уноса с добавкой суперпластификатора – относительно низкая себестоимость, низкая проницаемость, уменьшение тепловыделения – для крупных колонн и др. массивных конструкций. Очень высокая стойкость бетона к действию хлоридов - [Malhotra V.M.](#)

# 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)

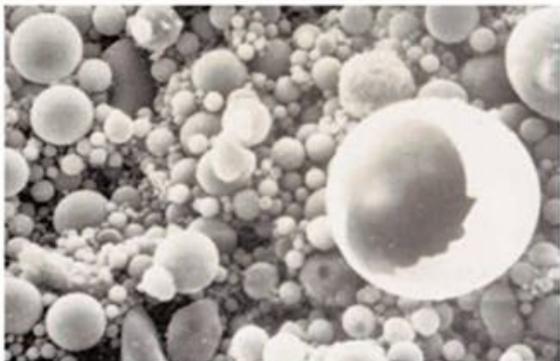
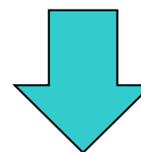


Fig. 3-2. Scanning electron microscope (SEM) micrograph of fly ash particles at 1000X. Although most fly ash spheres are solid, some particles, called cenospheres, are hollow (as shown in the micrograph). (54048)

- 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  $3,1 \text{ г/см}^3$ )).

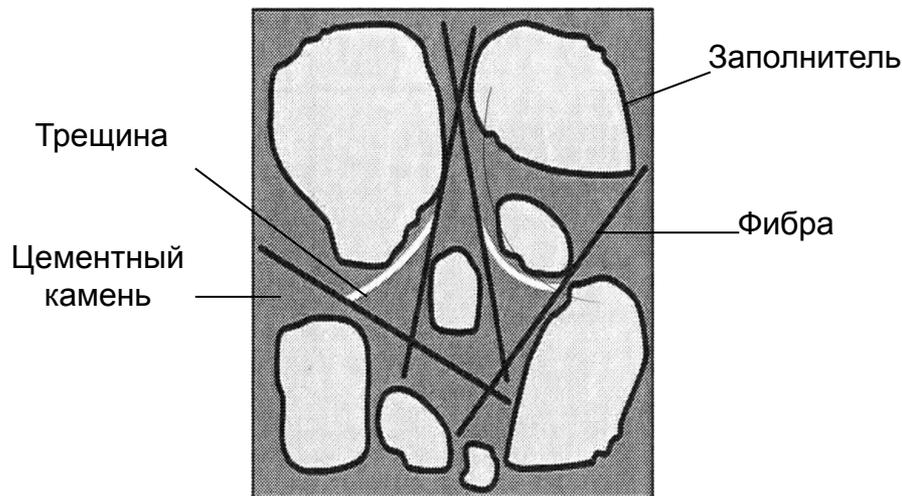


Повышение когезии бетонной смеси и подвижности, снижение расслаиваемости, улучшение прокачиваемости



# 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  $E_b/E_6 > 1$  возможно получение фибробетонов с повышенной прочностью на растяжение и трещиностойкостью. При  $E_b/E_6 < 1$  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%

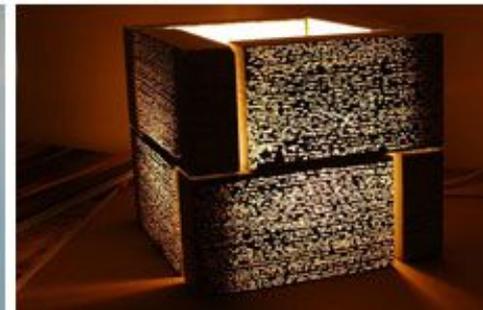
# Translucent Concrete Светопрopusкающий бетон

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.

# Self Cleaning Concrete Самоочищающийся бетон

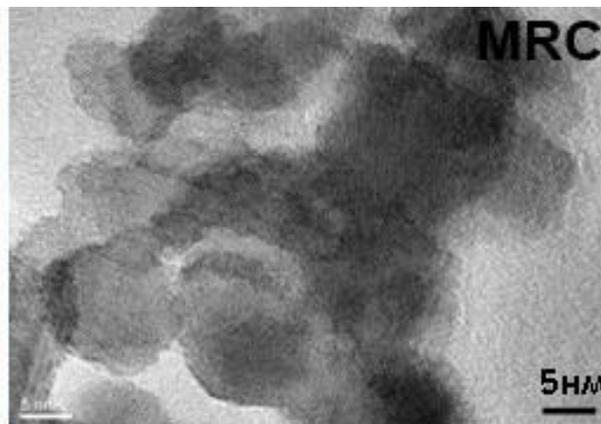
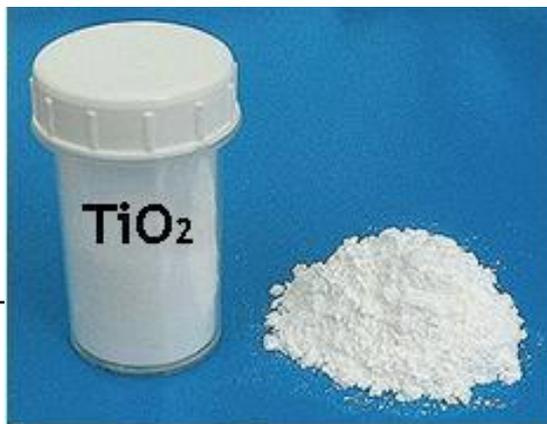
Jubilee Church Dives in Misericordia - Rome, 2003



Фот

иче

фотохимических реакций в присутствии катализатора ускорение  
фотохимических реакций в присутствии катализатора. При  
фотогенерируемом катализе фотохимическая активность зависит  
от способности катализатора создавать пары электрон ускорение  
фотохимических реакций в присутствии катализатора. При  
фотогенерируемом катализе фотохимическая активность зависит  
от способности катализатора создавать пары дырка ускорение  
фотохимических реакций в присутствии катализатора. При фотогенерируемом катализе фотохимическая



Диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) – 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),  $\text{TiO}_2$  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.

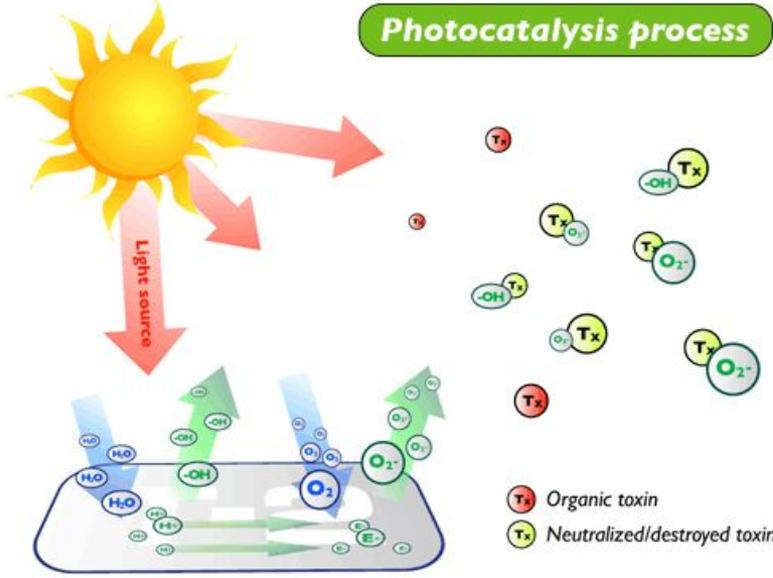
При использовании диоксида титана в структуре бетона процесс самоочищения базируется на двух явлениях: окисление и гидрофилизация.

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

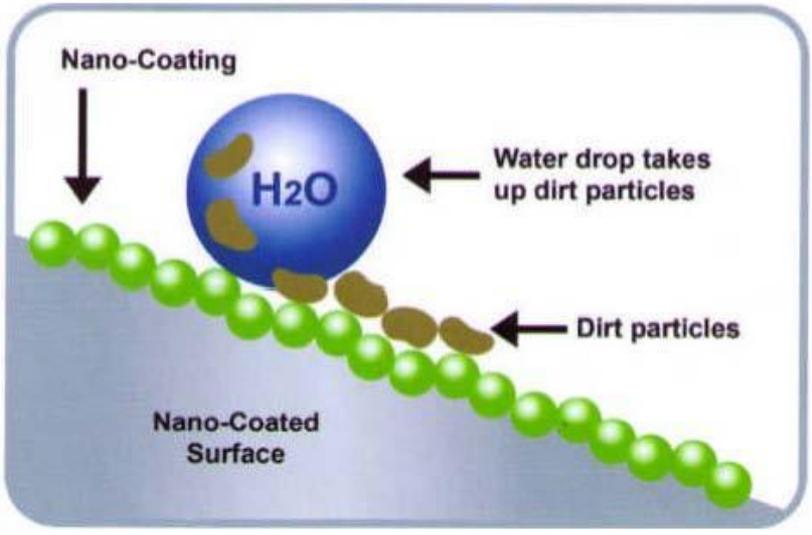


обрабатываемой поверхности, так как поверхность становится гидрофильной. Гидрофильная поверхность предотвращает формирование капель воды, которые могут образовывать пятна, впитывая грязь, а затем загрязнять поверхность. Вместо этого влага образует тонкую пленку по всей поверхности, что препятствует адгезии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

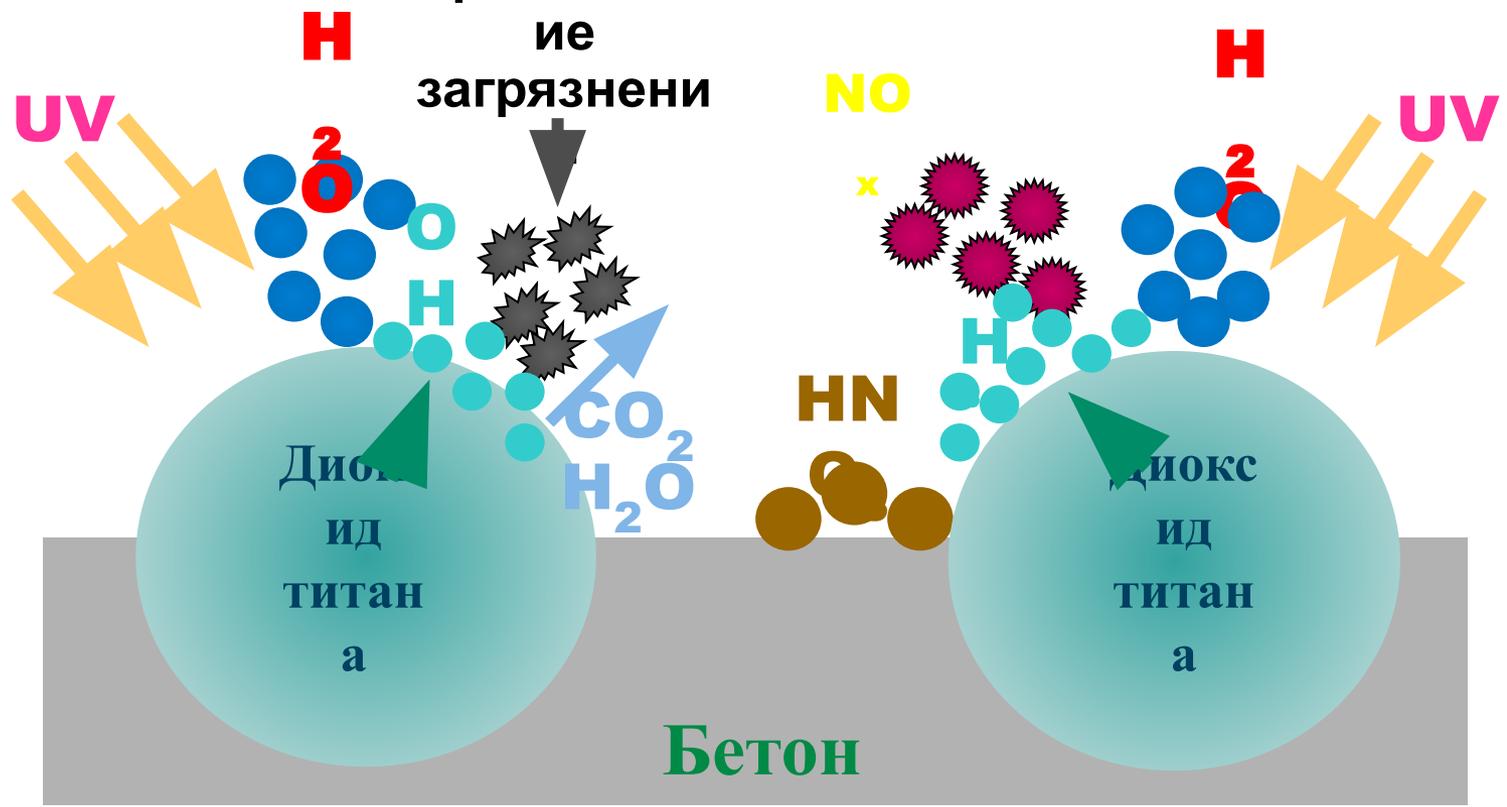
**Photocatalysis process**



- $T_x$  Organic toxin
- $-OH$  Neutralized/destroyed toxin



и ческ  
ие  
загрязнени



---

**Спасибо за внимание!**

