

# Оборудование и технологии производства ЖБИ, научно- практические решения по современным бетонам

**По статистке, ежегодное мировое производство бетона составляет почти 25 млрд. т — это более 13 млрд куб. м., или 2 т на каждого жителя планеты.**

Производство бетона в мире за последние несколько лет достигло объемов, сопоставимых со строительным бумом периода начала массового использования бетонных смесей в капитальном строительстве. Поскольку одним из показателей оздоровления экономики является состояние дел в строительной отрасли, то беспрецедентные объемы потребления бетонных смесей красноречиво говорят о развитии не только строительной отрасли, а и всей мировой экономики в целом. Мировым лидером по производству бетона по-прежнему остается Китай, еще в 2006 г. объем производства составлял 430 млн.м<sup>3</sup>, и с тех пор только увеличивается. В Китае запланировано строительство 45 домостроительных комбинатов – так называемых «Национальных фабрик индустриализации жилищного строительства», спонсируемых Министерством жилищного строительства.

Второе место по объему производимого бетона у Соединенных штатов Америки.



Впервые производство стеновых блоков заводского (промышленного) исполнения было налажено в Европе в середине 19-го века.

Первое промышленное применение технологии вибропрессования для изготовления бетонных изделий датируется 1914 годом (США).

Впоследствии эта технология распространилась по всему миру: Германия — 1929 г., Швеция — 1945 г.

В 1954 г. в СССР было принято решение о строительстве заводов по производству железобетонных изделий и заводов КПД.

За 40 лет было создано около 6000 таких производств. На «пике» развития в 1988 году ими выпускалось 153 млн м<sup>3</sup> сборных железобетонных изделий и конструкций.

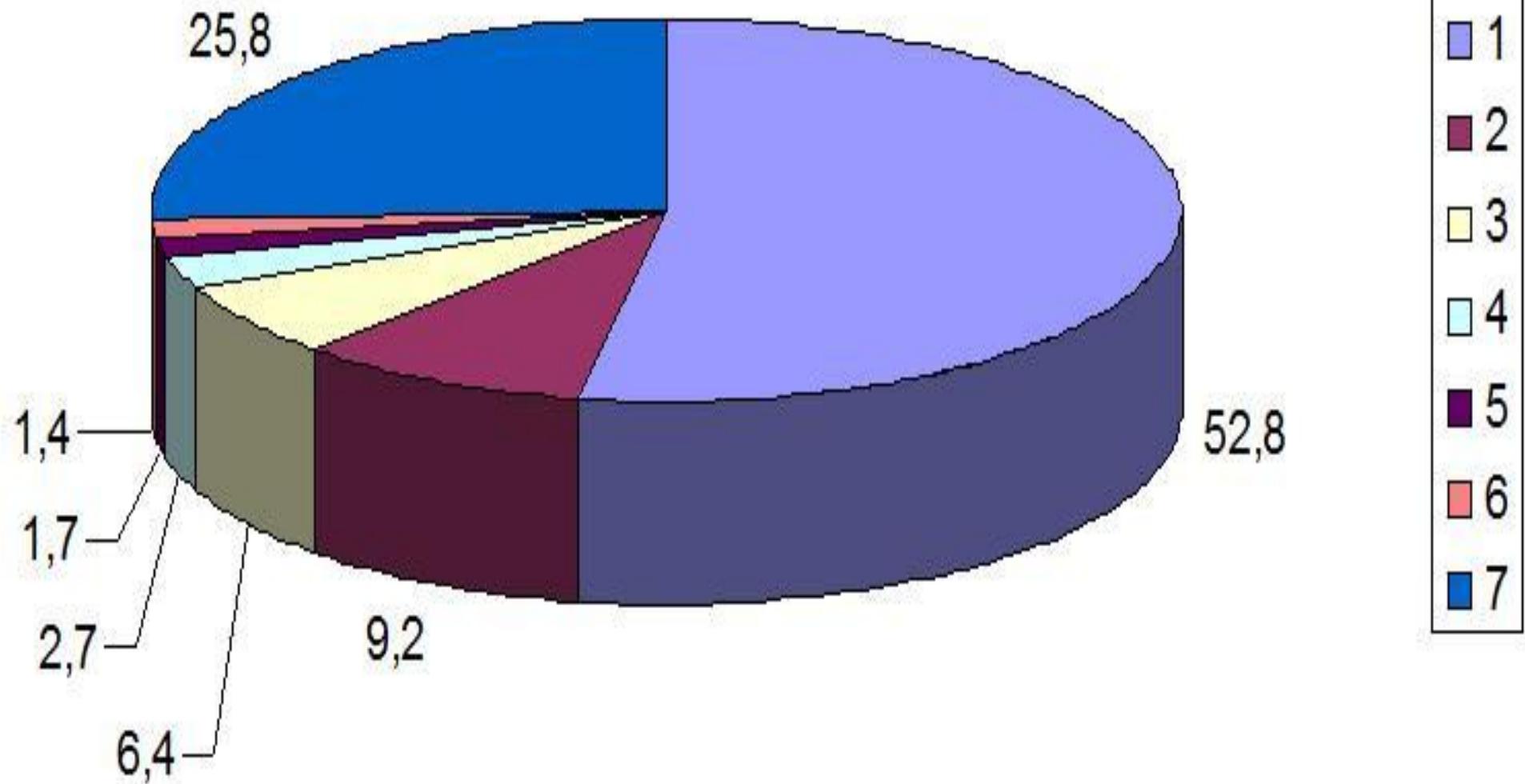
Начиная с 1993 года приходится констатировать упадок производства, приведший к развалу значительного числа этих предприятий.

### Объем производства бетона, млн. м<sup>3</sup>

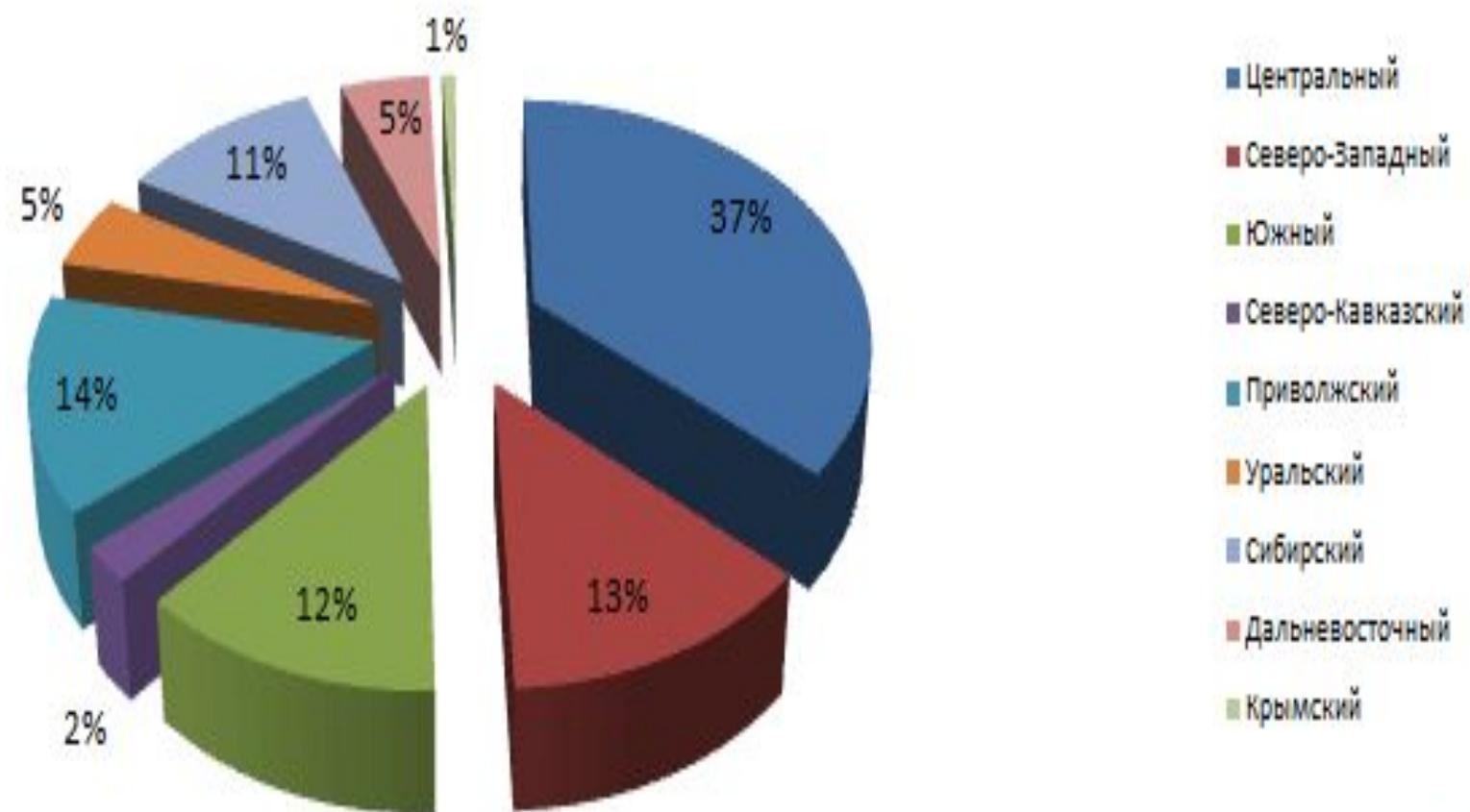
Государство	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
США	315	270	243	197	203	225	230
Япония	-	101	96	85	88	92	99
Турция	74,4	69,6	66,4	79,7	90	93	102
Италия	75,2	73,2	58,8	54,4	51,8	39,9	31,7
Испания	95,3	69	49	39,1	30,8	21,6	16,3
Россия*	38	52	45	40	40	42	44
Германия	40,8	41	37,7	42	48	46	45,6
Франция	45	44,1	37	37,4	41,3	38,9	38,6

В СССР в 1988 году объем производства составил 153 млн м<sup>3</sup>

Максимальный спад производства бетона имел место в 2009 г - 22,3 млн куб м.



1 – Китай, 2 – Западная Европа, 3 – Индия, 4 – США, 5 – Бразилия, 6 – Россия, 7 – прочие производители.



## Российская специфика

Россия в настоящее время, пожалуй, самая строящаяся страна в мире с большими территориями и огромной потребностью в жилье. На отечественном строительном рынке востребованы все современные технологии строительства и изготовления сборного железобетона. За последние 15 – 20 лет большинство предприятий стройиндустрии произвело полную или частичную модернизацию оборудования. Построено несколько крупных заводов по производству товарного и конструкционного бетона.

В первую очередь требуется жилье, доступное для среднего потребителя, высокие темпы строительства могут быть обеспечены крупно панельным домостроением. Около половины действующих заводов КПД— это предприятия с оборудованием 80-х годов, устаревшим и изношенным. При этом заводы КПД имеют узкую направленность на выпуск старых серий домов. Для оздоровления ситуации в строительной отрасли необходимо реализовать целый комплекс мер, среди которых:

- реструктуризация существующих строительных предприятий и разработка новых, более технологичных серий зданий;
- строительство новых современных комбинатов и заводов в регионах, где планируются массовые застройки;
- Обеспечение машиностроительными компаниями производства современных технологических линий и оборудования.

Сегодня на многих предприятиях бетонной промышленности проводятся работы по оптимизации производственных затрат, повышению производительности труда и качества продукции. Именно эти направления становятся наиболее важными для сохранения конкурентоспособности предприятия, актуально внедрение новых технологий в производство товарного и конструкционного бетона, экономия стройматериалов, и, прежде всего, цемента, как наиболее дорогостоящего из них.

Реализация этого комплекса мер невозможна без поддержки государства, поэтому самый главный фактор успешного решения вопроса строительства социально-доступного жилья — это государственное кредитование

## О новых бетонах

В современном строительстве применяется более тысячи различных видов бетона, и технологии производства продолжают совершенствоваться. Появились и получили широкое распространение эффективные вяжущие, модификаторы для бетонов, активные минеральные добавки и наполнители, армирующие волокна, новые технологические приемы и методы получения строительных композитов. Все это позволило не только создать и освоить производство новых видов бетона, но и значительно расширить номенклатуру применяемых в строительстве материалов: от суперлегких теплоизоляционных (менее 100 кг/м<sup>3</sup>) до высокопрочных конструкционных (с прочностью на сжатие до 200 МПа).

Разработка специальных цементов для особо высокопрочных бетонов и новые технологии позволяют значительно увеличивать прочность конструкций. Получены так называемые DSP-композиты (уплотненные системы, содержащие гомогенно распределенные ультрамалые частицы), они включают специально подготовленные цементы, микрокремнезем, заполнители и микроволокна, которые за счет специальных технологических приемов при В/Ц около 0,22 позволяют достичь прочности 270 МПа при высокой стойкости к коррозионным воздействиям и истиранию.

## Европейская Организация Готовых Бетонных Смесей

(European Ready Mixed Concrete Organization, ERMCO)

ERMCO является федерацией национальных бетонных организаций и включает в себя 21 действительного члена (Из ЕС - Австрия, Бельгия, Чехия, Дания, Финляндия, Франция, Германия, Греция, Ирландия, Италия, Нидерланды, Польша, Португалия, Словакия, Испания, Швеция, Великобритания; плюс Израиль, Норвегия, Швейцария и Турция), 3 ассоциированных члена (ассоциации Южной Америки, США и Индии) и 1 член-корреспондент (Россия, представлена НИИЖБ).

## Применение бетонов марок выше М800 (класс В60)



11% Норвегия



8% США



≈0,01% Россия





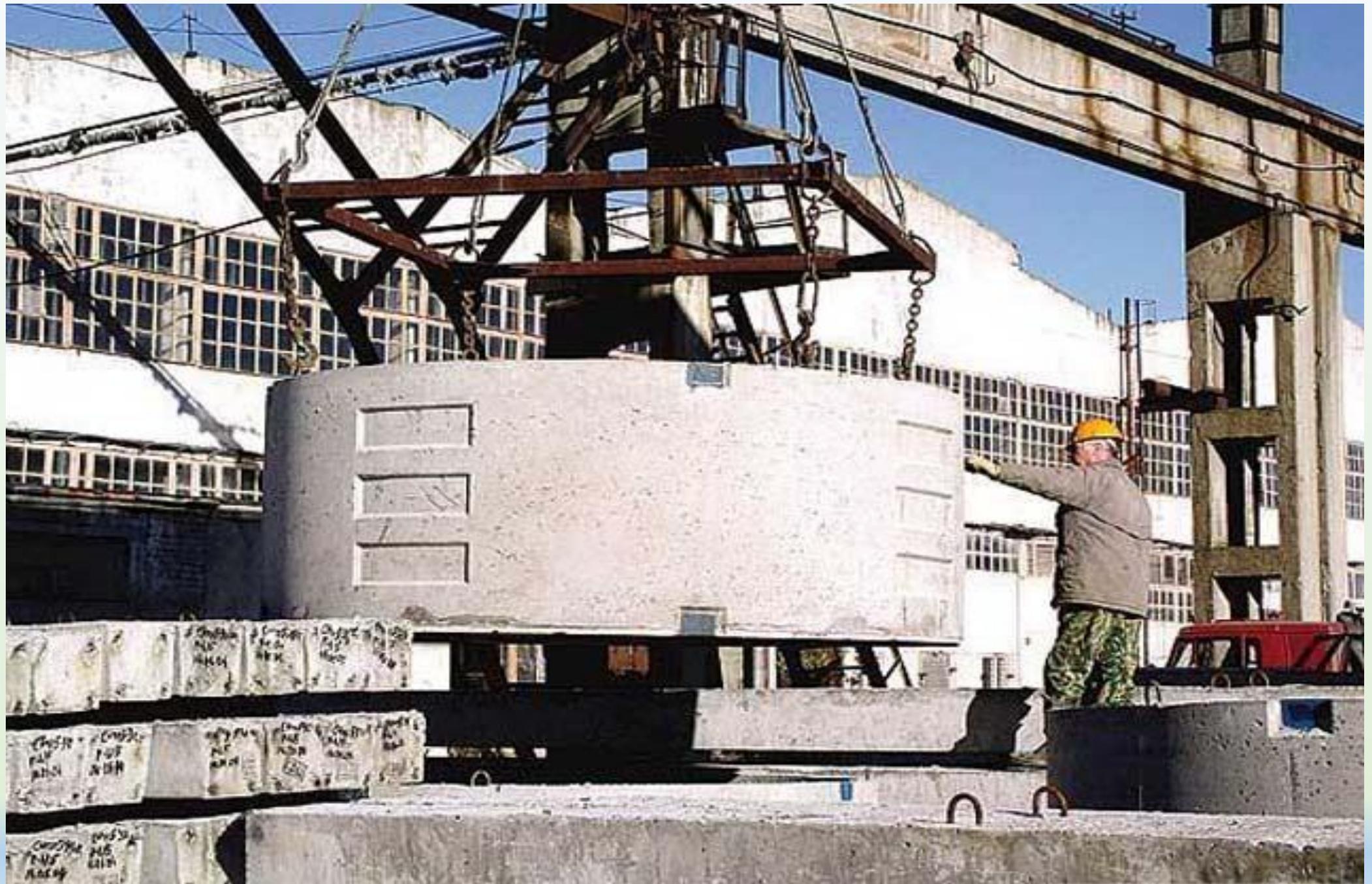












Бетонные заводы, технологическое  
оборудование





Главное требование к бетоносмесительному оборудованию — обеспечение качественного приготовления бетонной смеси. Чем быстрее, но при этом качественно, перемешана бетонная смесь, тем выше ценится такое оборудование. Совокупность скорости подачи инертных материалов, точности их дозировки и определения водоцементной составляющей, для проектной марки бетона, определяют выбор бетоносмесительного оборудования.

Производство высокотехнологичных бетонов с повышенным содержанием тонкодисперсных частиц и пониженным содержанием воды и пластификаторов требует комплексного подхода, охватывающего рецептуру, смесительную технику, а также реологические свойства готовой бетонной смеси. При помощи соответствующего регулирования процесса смешивания, опирающегося на принципы реологии, качество бетонных смесей может быть улучшено, а свойства высокотехнологичных бетонов оптимизированы.

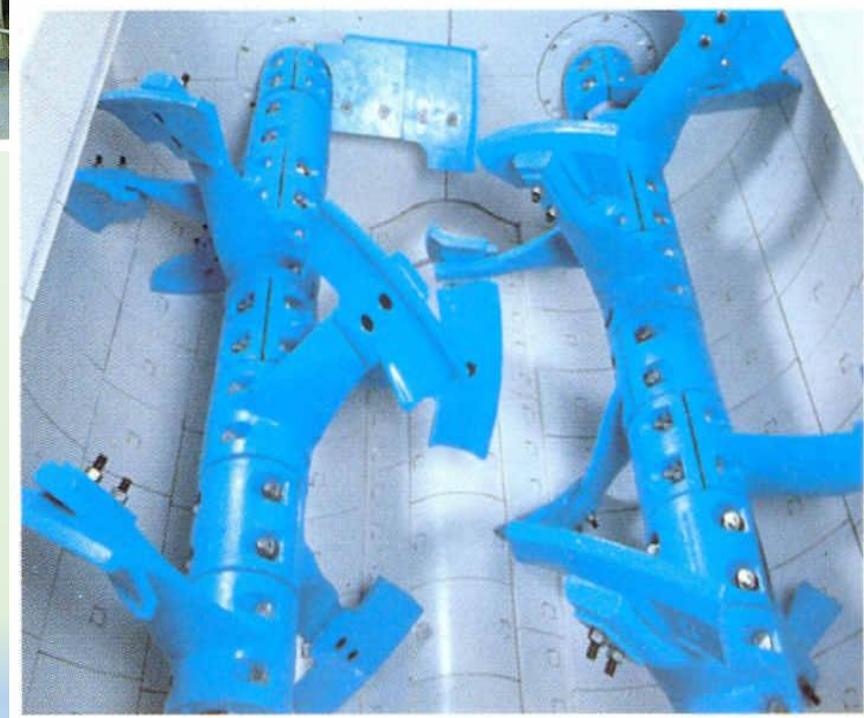
Основное внимание обращают на тип смесителя, продолжительность перемешивания замеса.

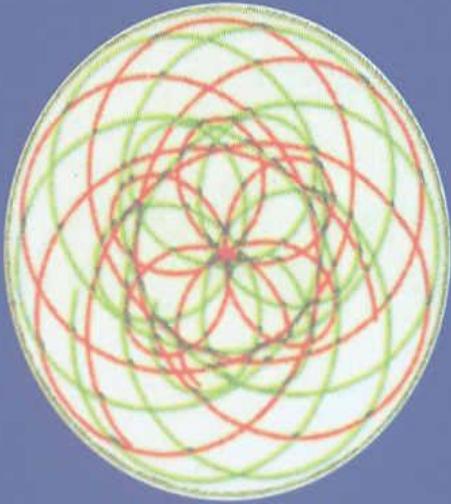


Двухвальный  
бетоносмеситель

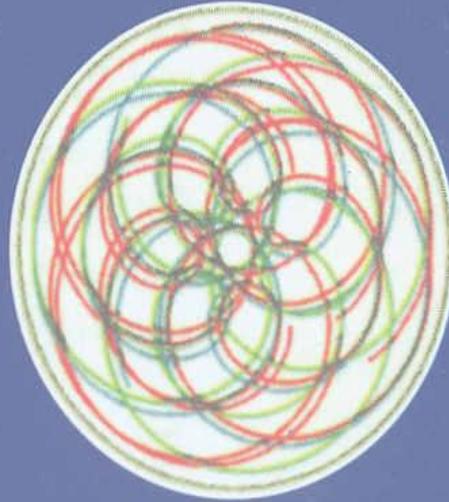


Планетарный  
бетоносмеситель

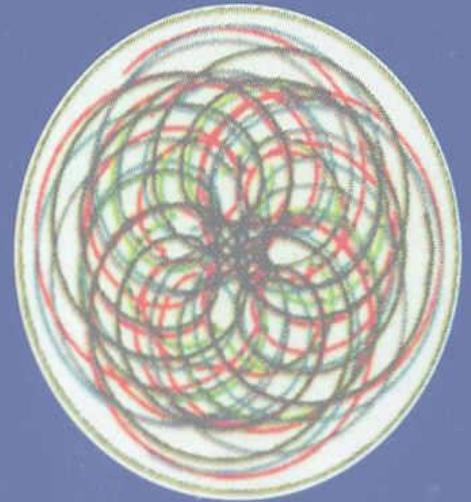




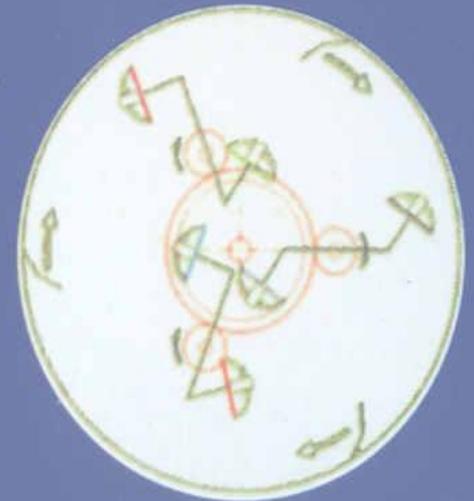
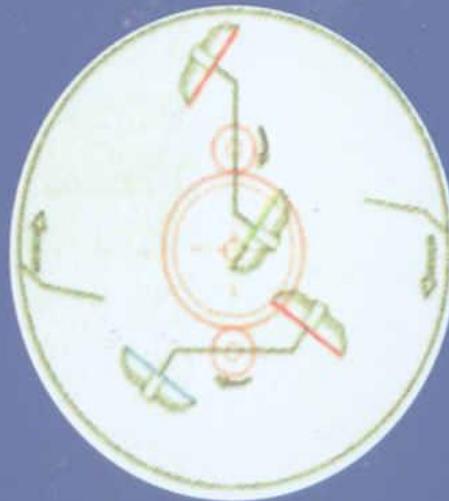
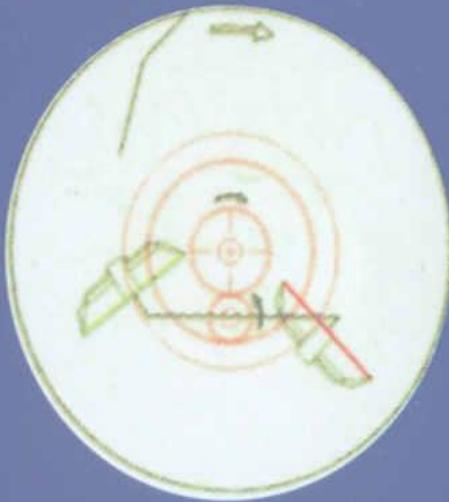
**HPGM 375-1125 L**



**HPGM 1500-2250 L**



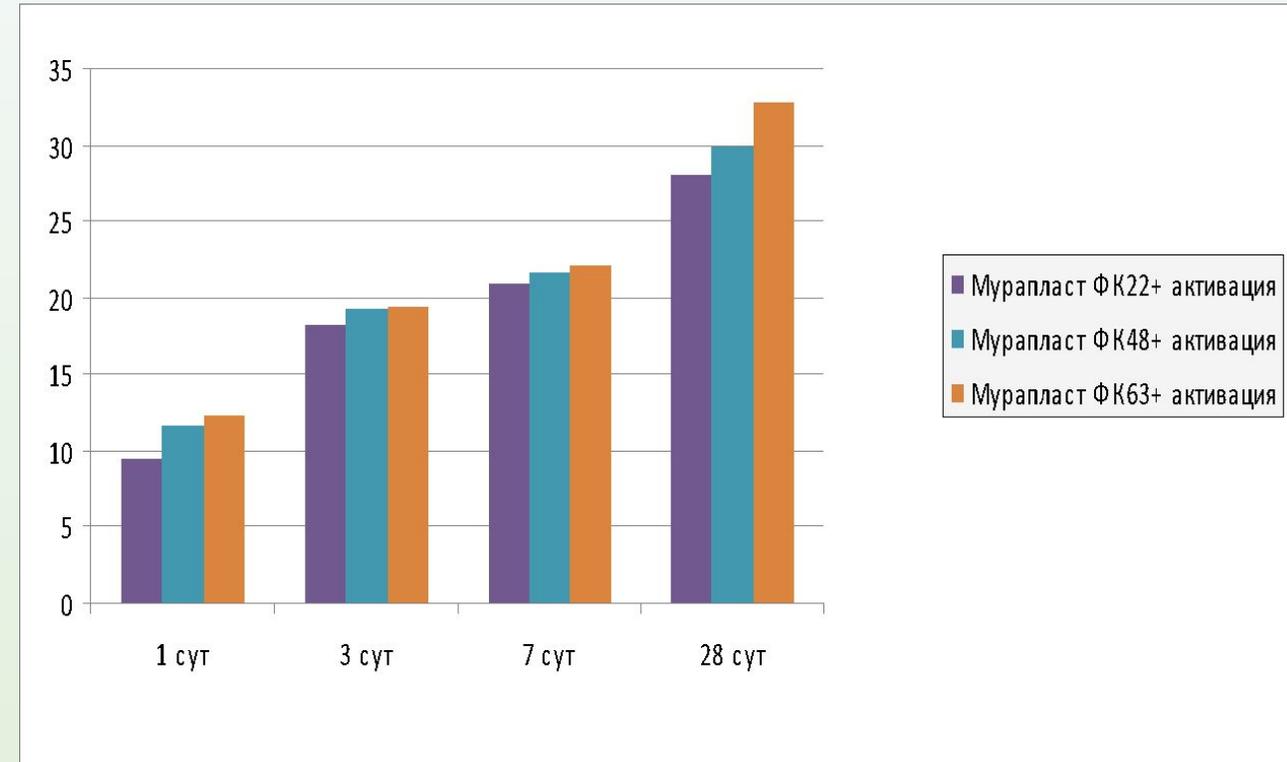
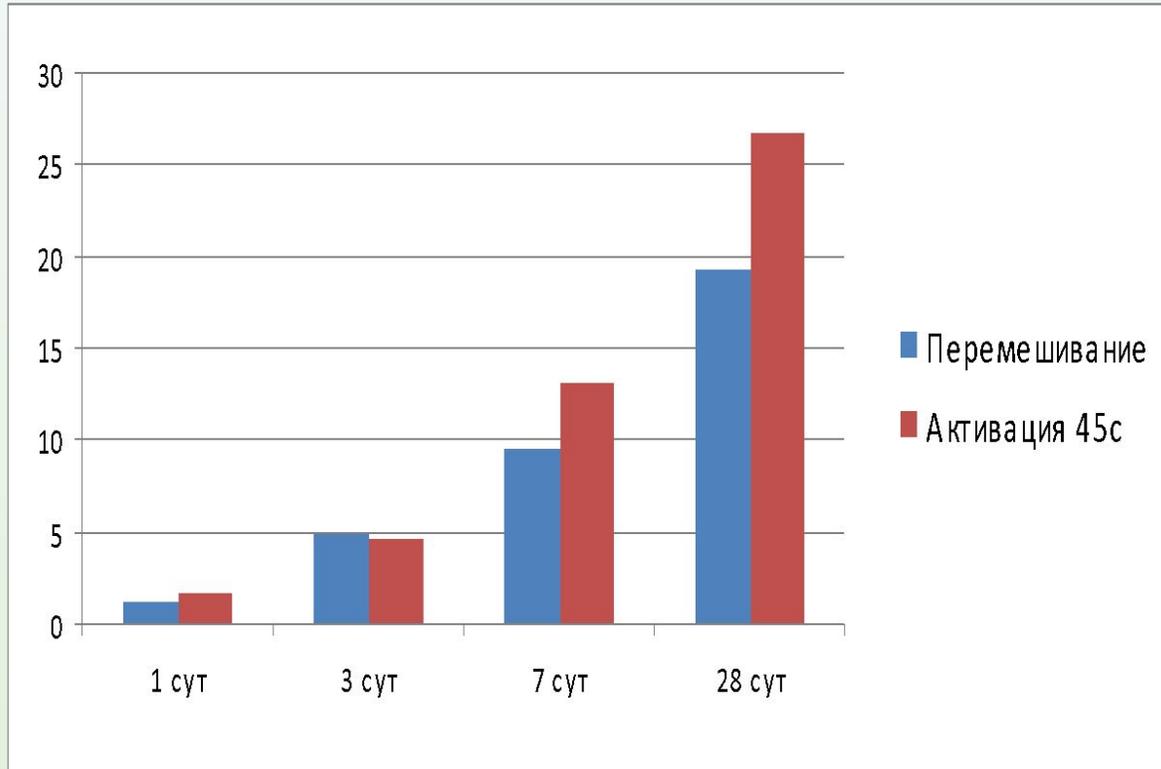
**HPGM 3000-4500 L**



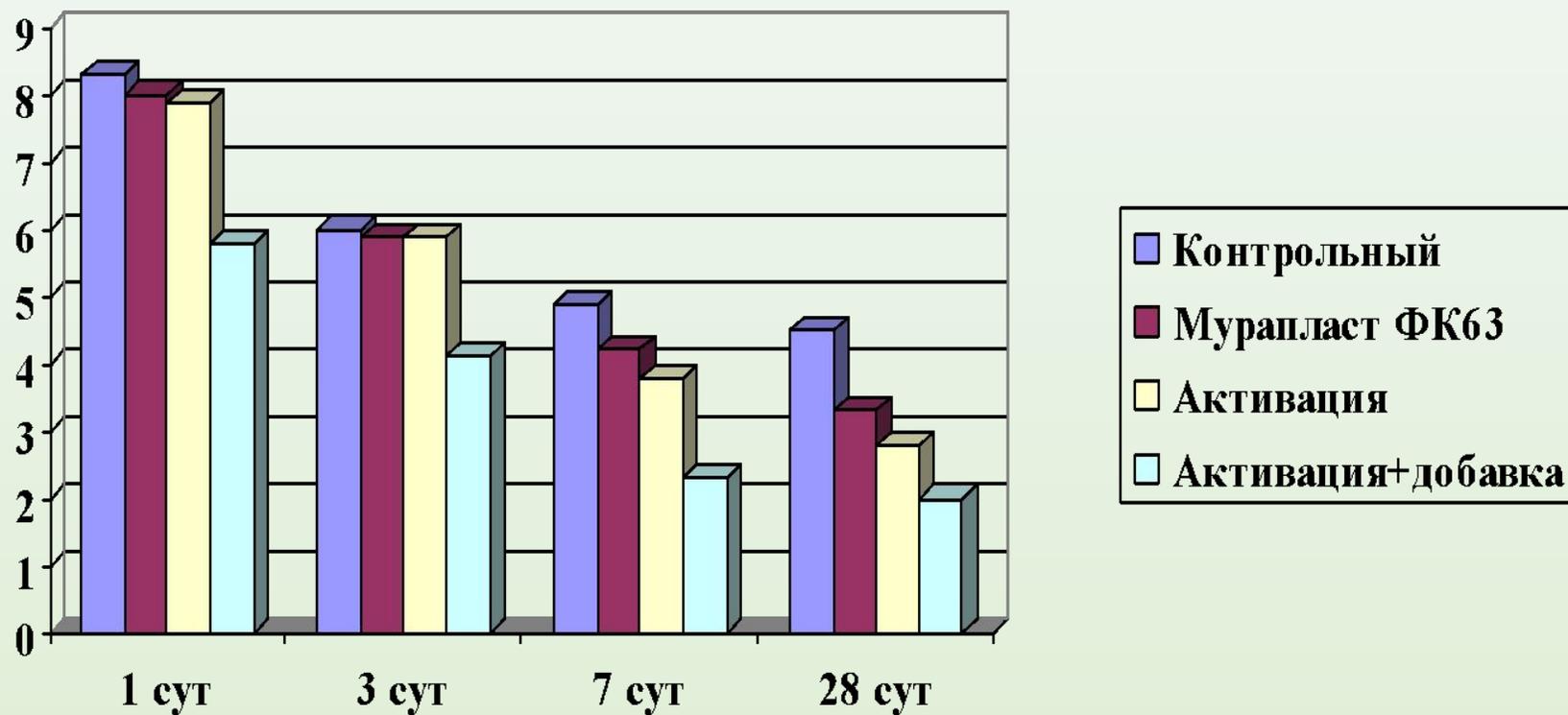
<b>HPGM</b>	<b>375</b>	<b>500</b>	<b>750</b>	<b>1125</b>	<b>1500</b>	<b>1875</b>	<b>2250-1</b>	<b>3000</b>	<b>3750</b>	<b>4500</b>
Ltr/L	375	500	750	1125	1500	1875	2250	3000	3750	4500
kg	700	900	1100	1800	2200	2800	3300	4500	5500	auf Anfrage/ upon request
kW	4	5,5	7,5	11	15	15	18,5	22	30	auf Anfrage/ upon request
m/sek	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	auf Anfrage/ upon request
mm	12	12	12	12	12	12	16	18	18	auf Anfrage/ upon request
kg	900	950	1100	1400	1700	1700	1800	2500	2700	auf Anfrage/ upon request

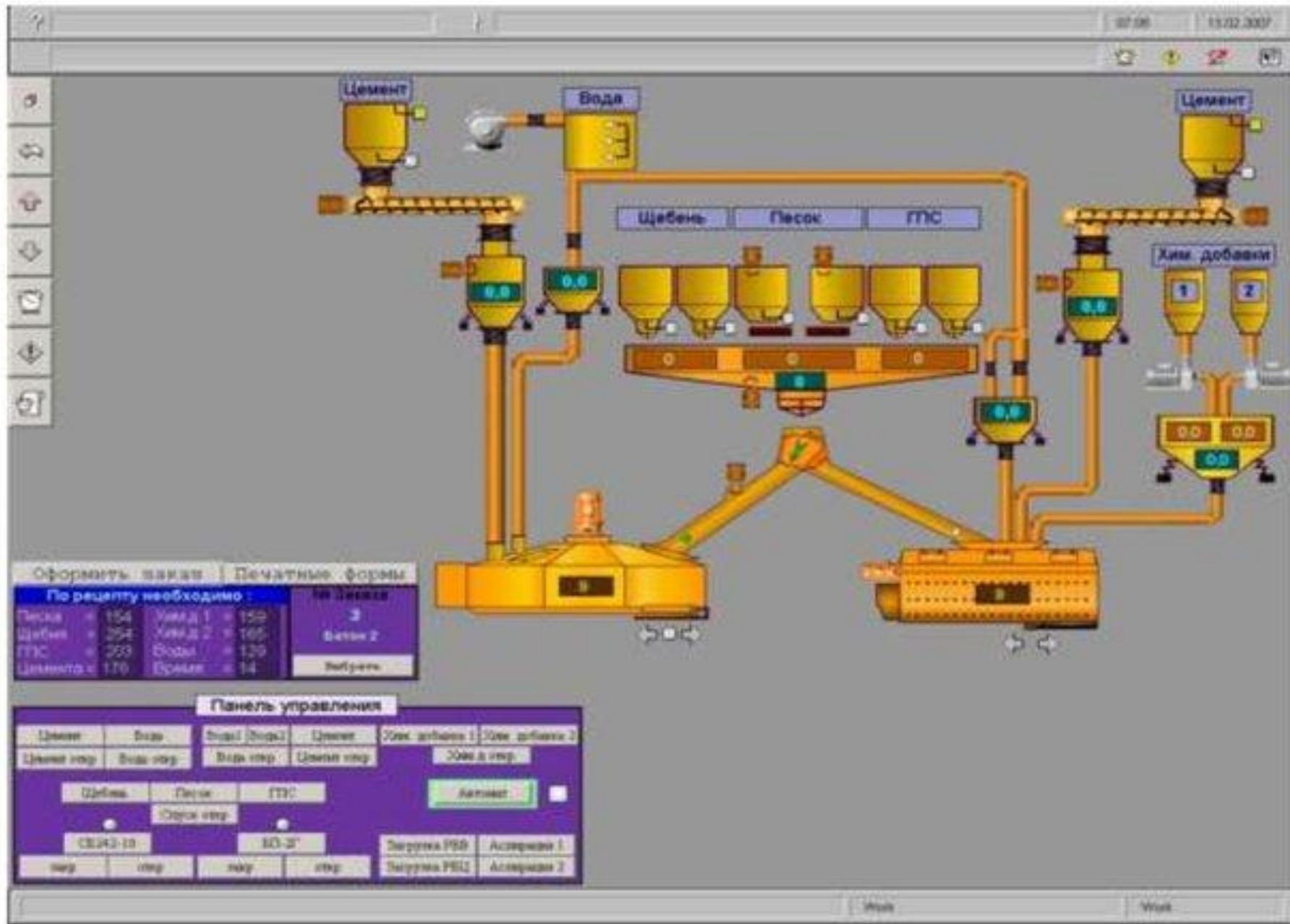


## Влияние активации на прочность цементно-песчаных растворов и бетонов

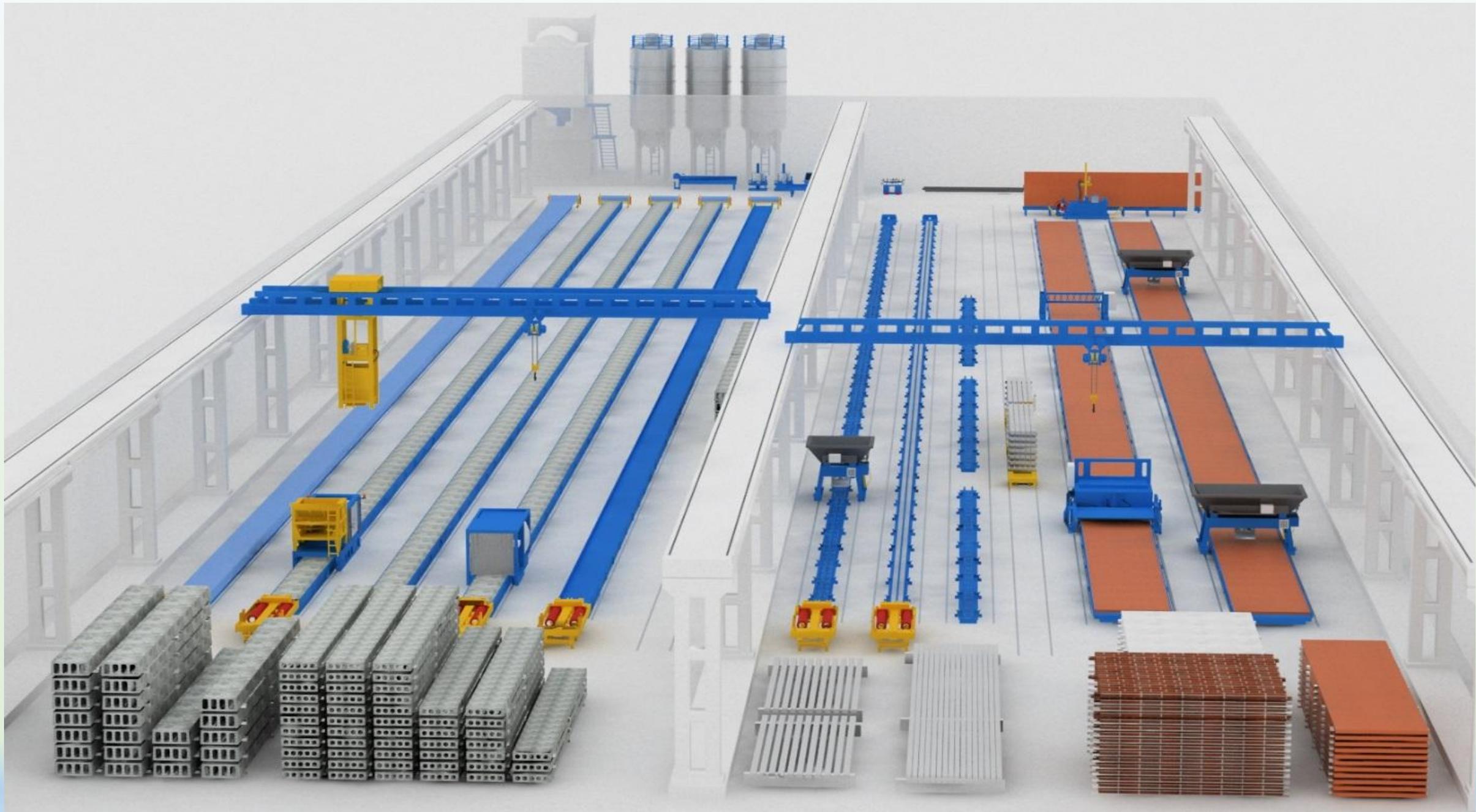


# Влияние активации на капиллярную пористость





Производство ЖБИ









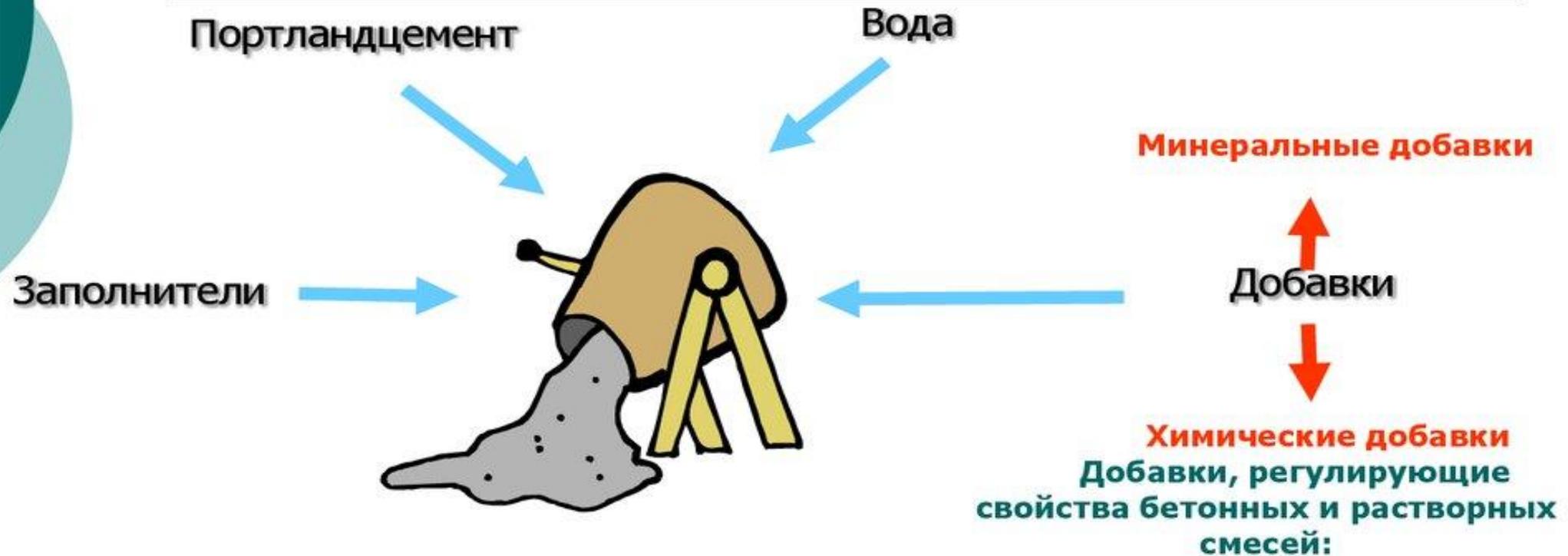






Научно-практические решения

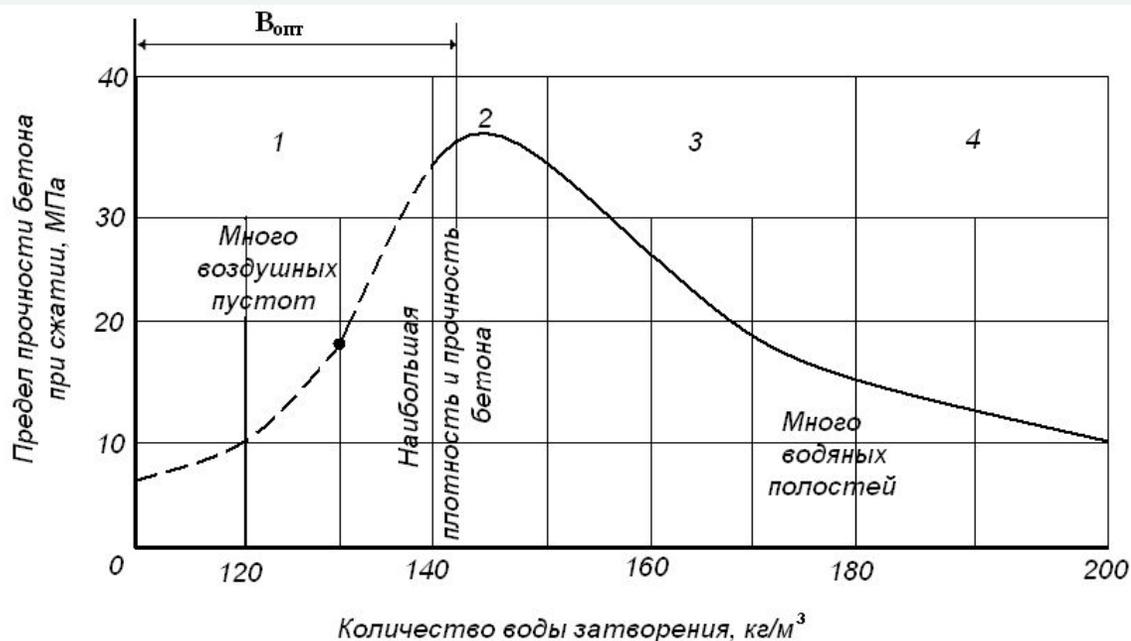
# Состав бетонной смеси



## Бетонная смесь

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

$$R_b = A \cdot R_{ц} \left( \frac{Ц}{В} - 0,5 \right)$$



Общая кривая зависимости прочности бетона и степени уплотнения от расхода воды (расход цемента постоянный); 1 – жесткий бетон, плохо уплотняемый без специальных приемов уплотнения, 2- область оптимального водосодержания в бетонной смеси ; 3, 4- избыточное содержание воды.

**Основное уравнение прочности бетона – эмперическая формула Болоемя-Скрамтаева:**

R<sub>b</sub> - прочность бетона в МПа,  
 А- коэффициент качества заполнителей (рядовые заполнители качество которых отвечает ГОСТ, А=0.6;  
 промытый и фракционированный щебень, А=0.65;  
 один из показателей не отвечает требованиям ГОСТ, А=0.55, в основном это превышение содержания ПГИ.

*Для тяжелых бетонов применяется заполнитель с прочностью в 1,5-2 раза больше заданной марки бетона.*

R<sub>ц</sub>- активность цемента (равна марочной прочности), МПа

Ц- Расход цемента на 1м<sup>3</sup>, кг

В- Расход воды, необходимый для обеспечения требуемой подвижности бетонной смеси, л

0.5 – эмпирический коэффициент

Физический смысл закона прочности бетона. Закон прочности бетона устанавливает зависимость прочности от качества применяемых материалов и пористости бетона. Прочность вяжущего характеризуется его маркой ( $R_{ц}$ ), качество заполнителя коэффициентом  $A$ , а пористость косвенно определяется величиной водо-цементного отношения  $V/C$ , для гидратации цемента необходимо 15-18% воды от массы цемента, на производстве применяются бетонные смеси, в которых содержание воды достигает 50мас.%.  
Зависимость прочности от  $V/C$  является в сущности зависимостью прочности от объема пор, образованных водой, не вступающей в химическое взаимодействие с цементом.

Для высокопрочных бетонов с  $V/C$  отношением ниже 0.4 (или  $C/V$  более 2.5 применяют формулу:

$$R_{б} = A_1 R_{ц} (C/V + 0,5).$$

В этой формуле для высококачественных заполнителей  $A_1 = 0,43$ , для рядовых  $A_1 = 0,4$ .

## Влияние дисперсности на активность цемента

Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Прочность при сжатии в МПа, возрасте				Прочность после ТВО, МПа	Марка цемента
	1	3	7	28		
Исходный ПЦ	11.7	24.7	38.4	48	34.5	400
3960	13.6	30.8	43.4	56	40.5	550
5100	18.6	40.2	50.9	58.6	45.3	550
Шлакопортландцемент с добавкой шлака, состава клинкер : шлак= 50:50						
3050	2.5	8.1	13	29.6	19.6	300
4130	3.9	14.2	19.5	42.5	28.2	400
4960	4.5	17.8	29.5	51.5	30.6	500

За проектную марку бетона по прочности на сжатие принимают сопротивление осевому сжатию (кгс/см<sup>2</sup>) эталонных образцов-кубов.

За проектную марку бетона по прочности на осевое растяжение принимают сопротивление осевому растяжению (кгс/см<sup>2</sup>) контрольных образцов (марка назначается тогда, когда она имеет главенствующее значение).

Проектную марку бетона по прочности на сжатие контролируют путем испытания стандартных бетонных образцов: для монолитных конструкций – в возрасте 28 сут, для сборных конструкций – в сроки, установленные для данного вида изделий стандартом или техническими условиями.

Прочность бетона определяют путем испытания образцов, которые изготавливают сериями; серия, как правило, состоит из трех образцов.

Предел прочности при растяжении возрастает при повышении марки бетона по прочности при сжатии, однако увеличение сопротивления растяжению замедляется в области высокопрочных бетонов. Поэтому прочность бетона при растяжении составляет 1/10–1/17 предела прочности при сжатии, а предел прочности при изгибе – 1/6–1/10.

Класс бетона – это числовая характеристика какого-либо его свойства, принимаемая с гарантированной обеспеченностью 0,95. Это значит, что установленное классом свойство обеспечивается не менее чем в 95 случаях из 100 и лишь в 5-ти случаях можно ожидать его не выполненным.

$$B = R_b (1 - V \cdot t)$$

$B$  – гарантированная прочность бетона

$R_b$  – средняя прочность бетона по результатам испытаний

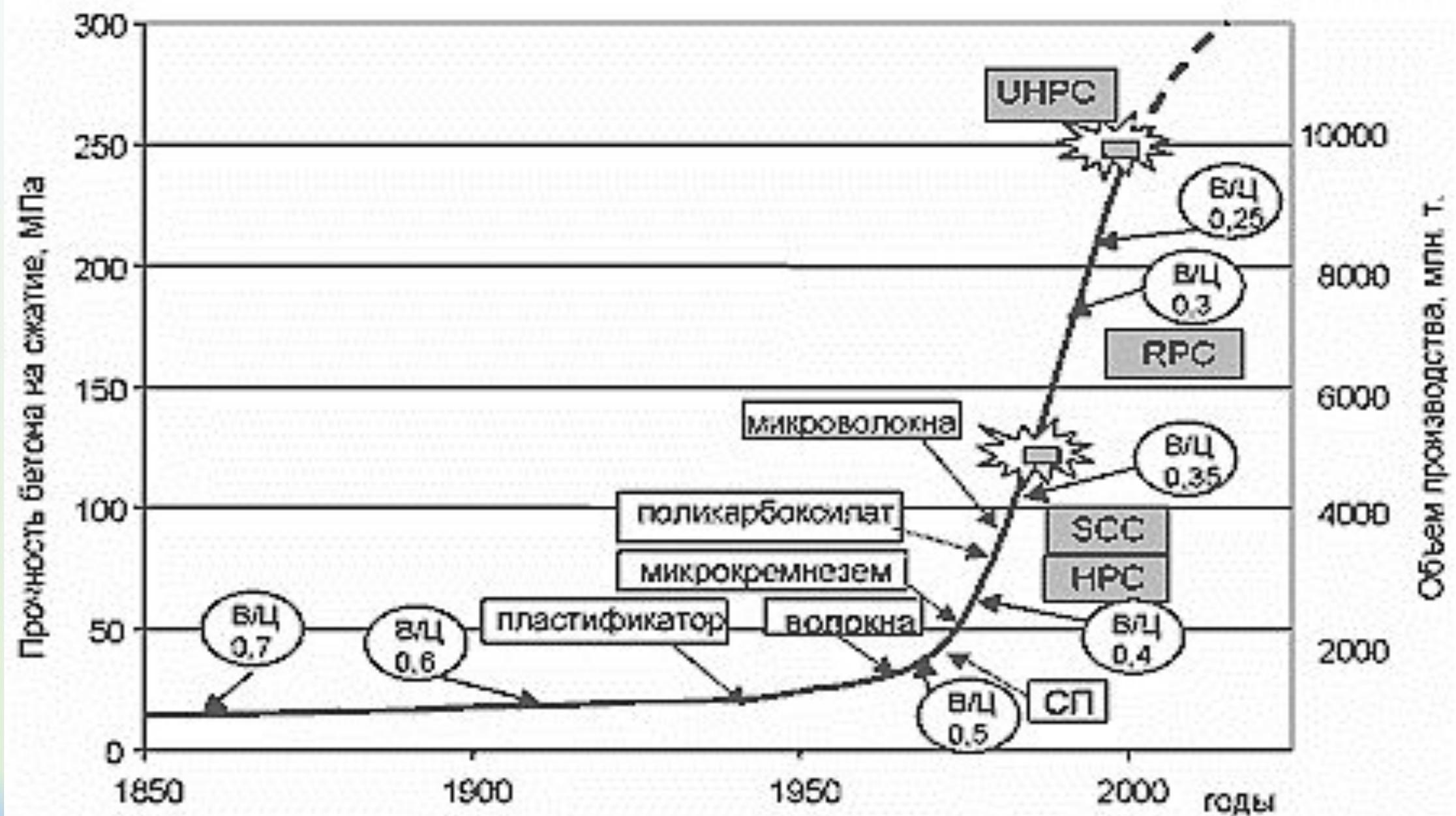
$V$  коэффициент вариации прочности бетона

$t$  – критерий Стьюдента, при гарантии прочности с обеспеченностью 95%,  $t = 1,63$

Нормативный коэффициент вариации  $V = 13,5\%$  (0,135), при больших значениях можно оценивать производство, как не стабильное.

Классы прочности по EN.

Марка бетона	Прочность, МПа	
	цилиндры	кубы
<b>C 8/10</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>C 12/15</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
<b>C 16/20</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>C 20/25</b>	<b>20</b>	<b>25</b>
<b>C 25/30</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>C 30/37</b>	<b>30</b>	<b>37</b>
<b>C 35/45</b>	<b>35</b>	<b>45</b>
<b>C 40/50</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>C 45/55</b>	<b>45</b>	<b>55</b>
<b>C 50/60</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b>C 55/67</b>	<b>55</b>	<b>67</b>
<b>C 60/75</b>	<b>60</b>	<b>75</b>
<b>C 70/85</b>	<b>70</b>	<b>85</b>
<b>C 80/95</b>	<b>80</b>	<b>95</b>
<b>C 90/1 05</b>	<b>90</b>	<b>105</b>
<b>C 100/1 15</b>	<b>100</b>	<b>115</b>



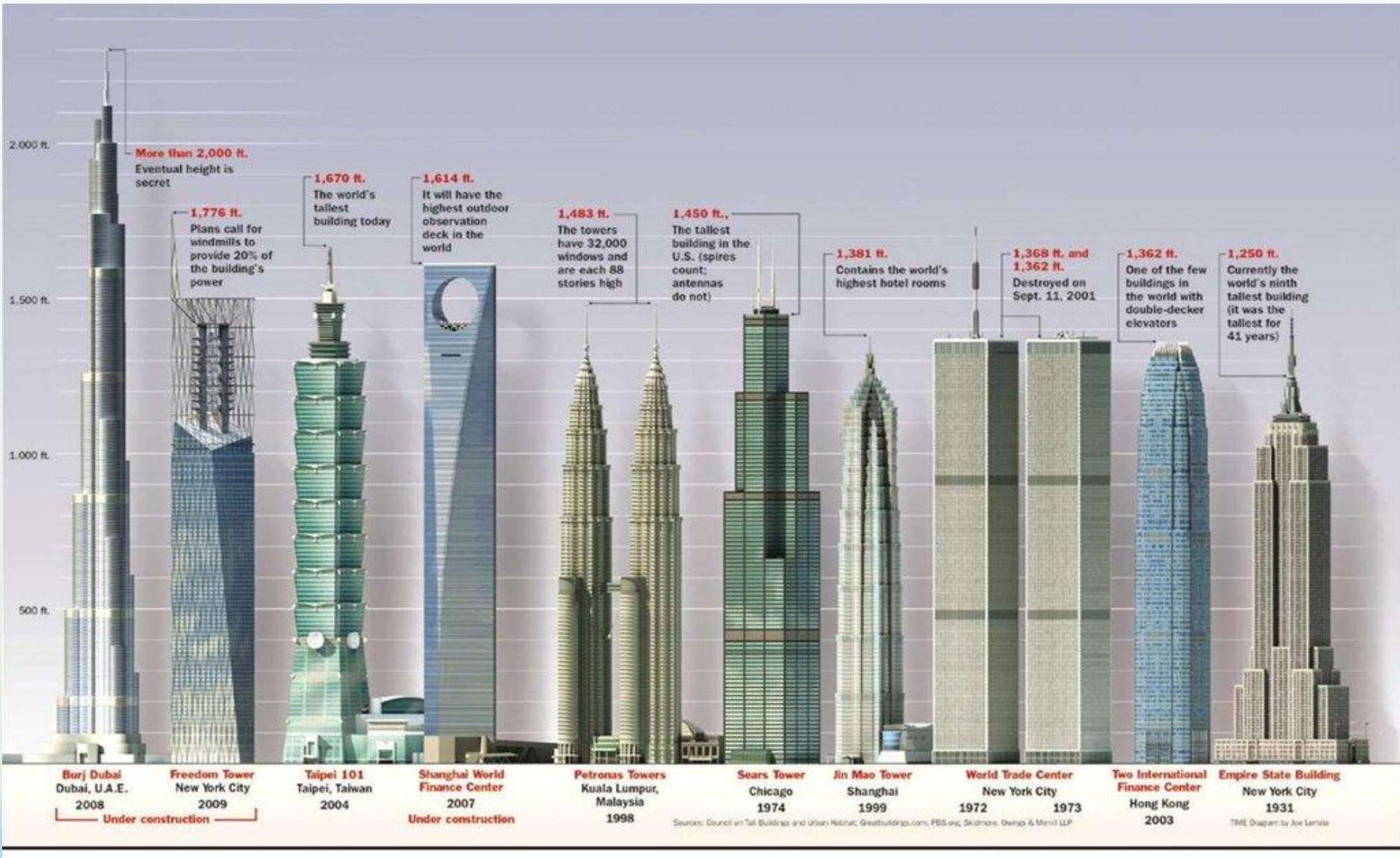
# Современный уровень технологии позволяет представить концепцию развития бетонов:

- Высокие физико-технические характеристики бетонов: класс по прочности В40...В80, низкая проницаемость (эквивалентная маркам W12...W20), низкая усадка и ползучесть, повышенная коррозионная стойкость и долговечность, т.е. характеристики, сочетание которых или преобладание одной из которых обеспечивает высокую надежность конструкций в зависимости от условий эксплуатации;
- Доступная технология производства бетонных смесей и бетонов с вышеуказанными характеристиками, основанная на использовании традиционных материалов и сложившейся производственной базы

В середине 60-х годов бетон класса прочности выше С55 (цифра обозначает прочность на сжатие выдержанного в воде бетонного цилиндра высотой 300 мм и диаметром 150 мм в возрасте 28 дней), такой бетон получил название высокоэффективного бетона (НРС).

## ЕВРОПЕЙКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

- 1) бетон нормальной прочности до В60 МПа
- 2) Высокая прочность бетона В60 до В100 МПа
- 3) Очень высокая прочность бетона (ВНРС) В100 - В150 МПа
- 4) ультра высокоэффективный бетон (УНРС) В150-В300 МПа



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

T&E Diagram by Joe Lantini



## Petronas Tower Kuala Lumpur

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



## ММДЦ «Москва- Сити»:

- бетон В80-В90;
- $V/\Omega=0,24-0,28$
- ОК=18-22 см.



Американский институт бетона определяет высокоэффективный бетон - "Бетон, отвечающий особым требованиям к эксплуатационным характеристикам и однородности, которые не всегда могут быть достигнуты обычным способом с использованием только обычных материалов и обычных методов смешивания, укладки и отверждения". Эти требования могут включать в себя улучшение таких характеристик, как уплотнение без расслоения и водоотделения, высокая прочность в раннем возрасте или длительный срок службы в суровых условиях. Ниже приведена классификация высокоэффективных бетонов, связанная с прочностью.

<b>Compressive strength (Mpa)</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>150</b>
<b>High Performance Class</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>

# Научная основа разработок

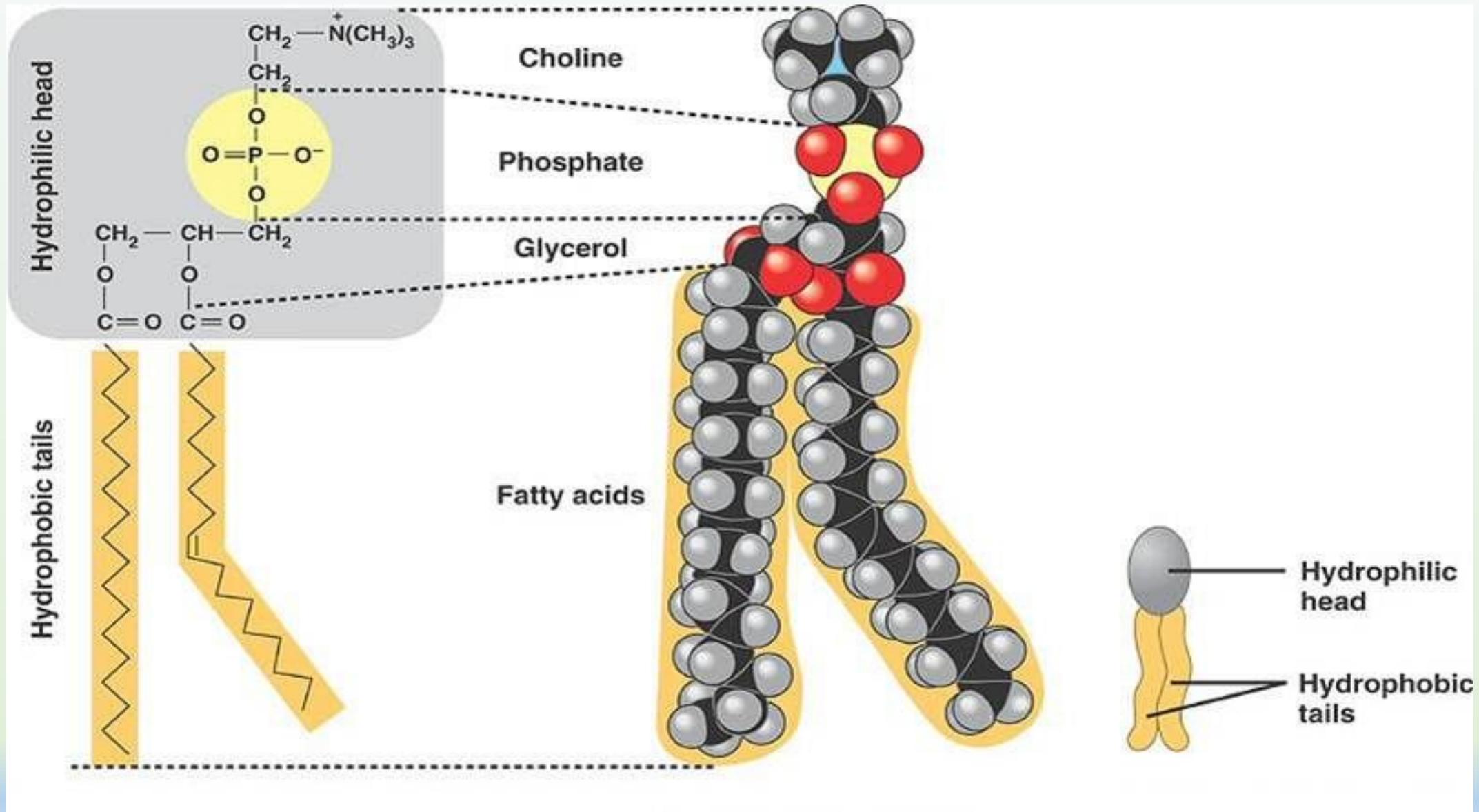
В качестве модификаторов и активных компонентов применяют ряд веществ и материалов, влияющих на реологию смеси, структуру и свойства материала, кинетику физико-химических процессов:

- комплексы химических модификаторов различного назначения;
- ультрадисперсные наполнители-уплотнители и активизаторы;
- компоненты, управляющие объемными изменениями структуры;
- компоненты, позволяющие управлять физико-химическими процессами твердения и гарантирующие долговечность бетона, придающие бетону специальные свойства;
- компоненты, позволяющие совместно с химическими модификаторами управлять реологией бетонной смеси и процессами твердения;
- дисперсные волокнистые материалы

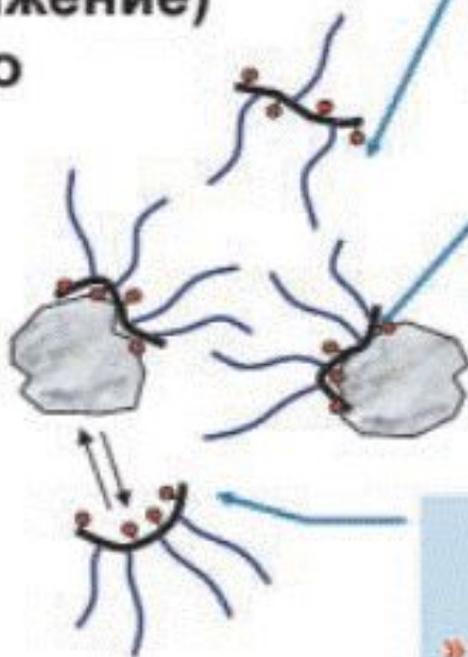
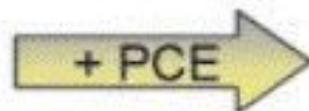
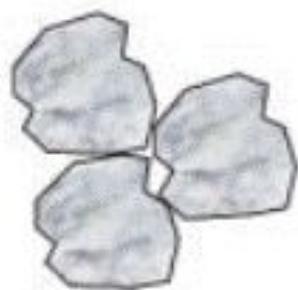
**Помимо правил производства высокопрочных бетонов для изготовления УНРС были разработаны следующие технологические требования:**

- дальнейшее сокращение водоцементного отношения до  $V/C = 0,2$ ;
- неременное использование микрокремнезема и пластификатора;
- оптимизация плотности упаковки зерен заполнителя вплоть до нановеличин;
- ограничение максимального размера крупнейших зерен до 8 мм, как правило, до 2 мм;
- использование заполнителей из горных пород повышенной прочности;
- твердение в условиях повышенного давления (до 500 бар) и повышенной температуры (до 250 0С).

С целью сокращения взрывоопасного скалывания материала и повышения его прочности на растяжение или на изгиб добавляют, как правило, от 1,5 до 2,5% от объема мелкой стальной фибры.



## Диспергирование (разжижение) вследствие стерического отталкивания



Зерна  
агломератов

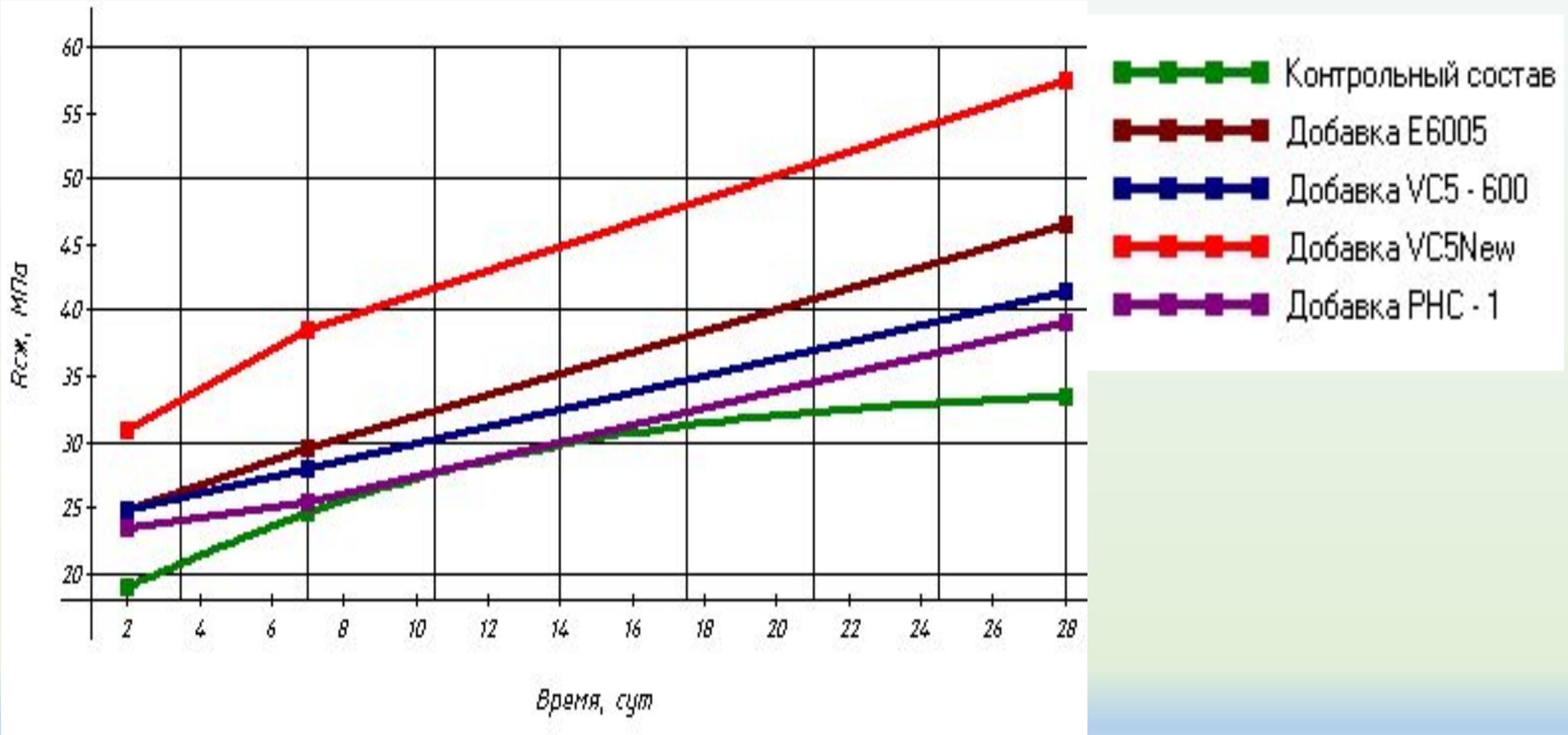
Свободные  
молекулы  
↪ Сохранение  
консистенции

Абсорбированные  
молекулы  
↪ Диспергирование

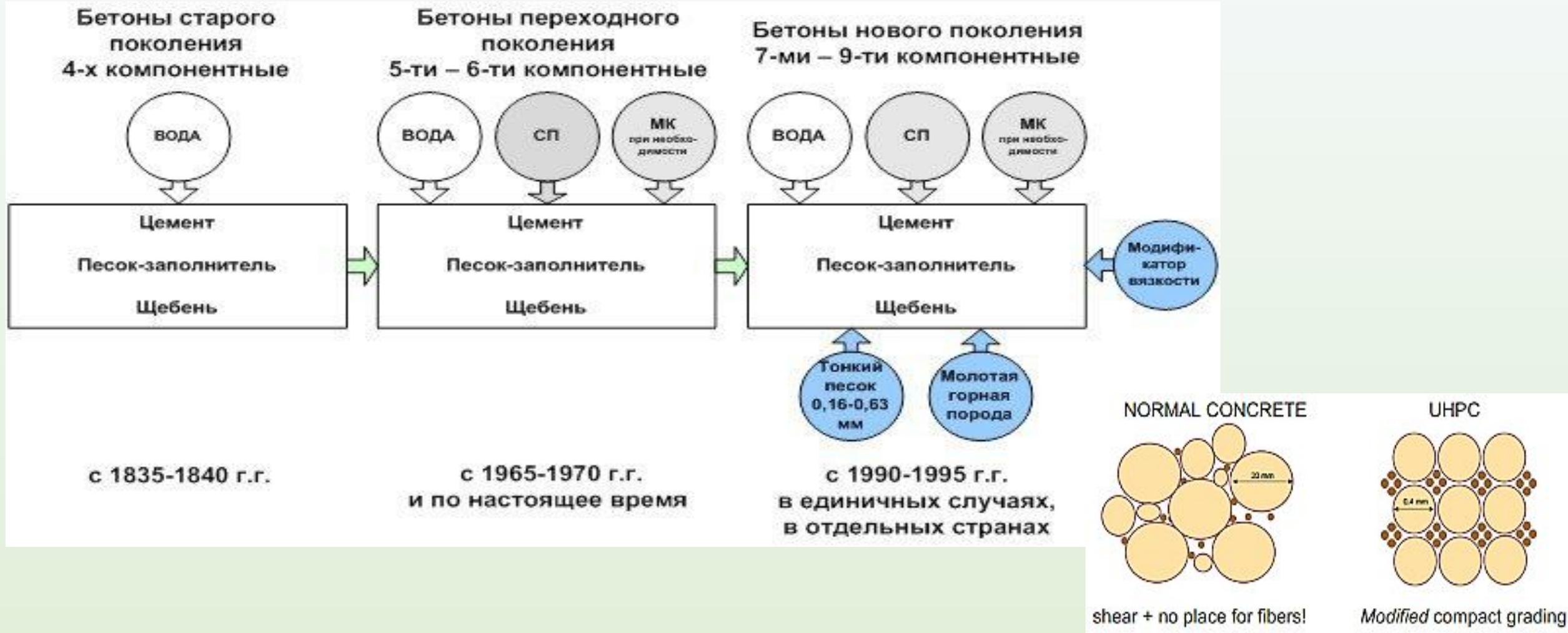
Адсорбция ⇌ Десорбция

- » PCE-Тур
- » Поверхность цемента
- » Фазы клинкера
- » (Температура/Время  
смешивания )

Снижение количества воды затворения в присутствии добавок приводит к росту прочности бетона в возрасте 2, 7 и 28 суток



Высокоэффективный бетон содержит один или несколько тонкодисперсных материалов, таких как летучая зола, микрокремнезем, молотый доменный шлак, каменная мука, маршалит и высокоэффективные супер-или гиперпластификаторы.



# Основные факторы получения высокопрочных и долговечных бетонов, в мировой

## практике

- 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).

НРС:  $(V/C < 0,35$  или  $C/V > 2,86)$ ,  $(C+MK)/V$

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

Формула прочности **De Larrard**:

$k_G$  – коэффициент, учитывающий

качество заполнителей (4,9...5,2);

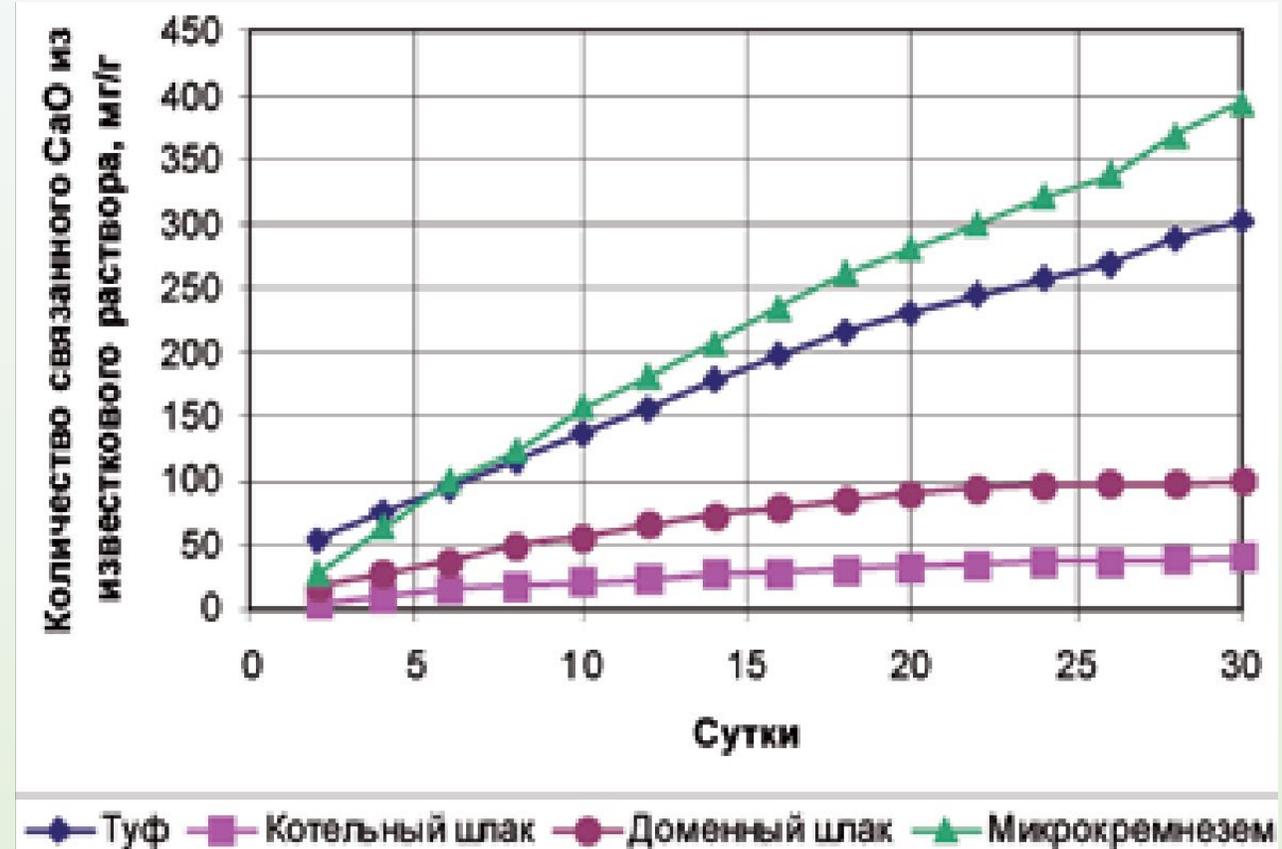
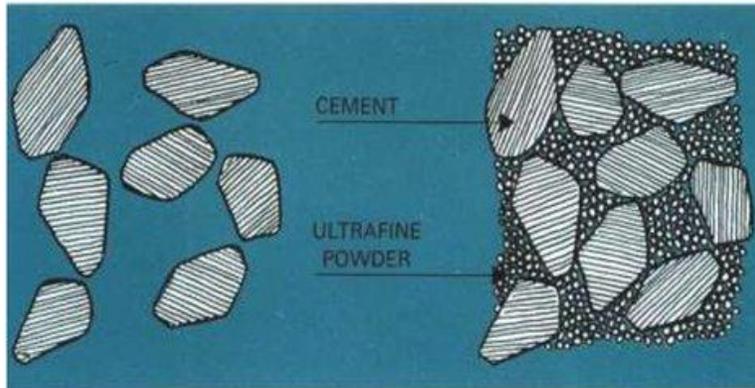
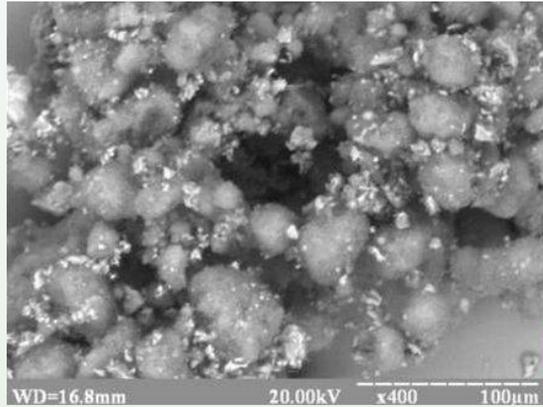
$k_C$  – активность цемента, МПа;

$W/C$  – водоцементное отношение;

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

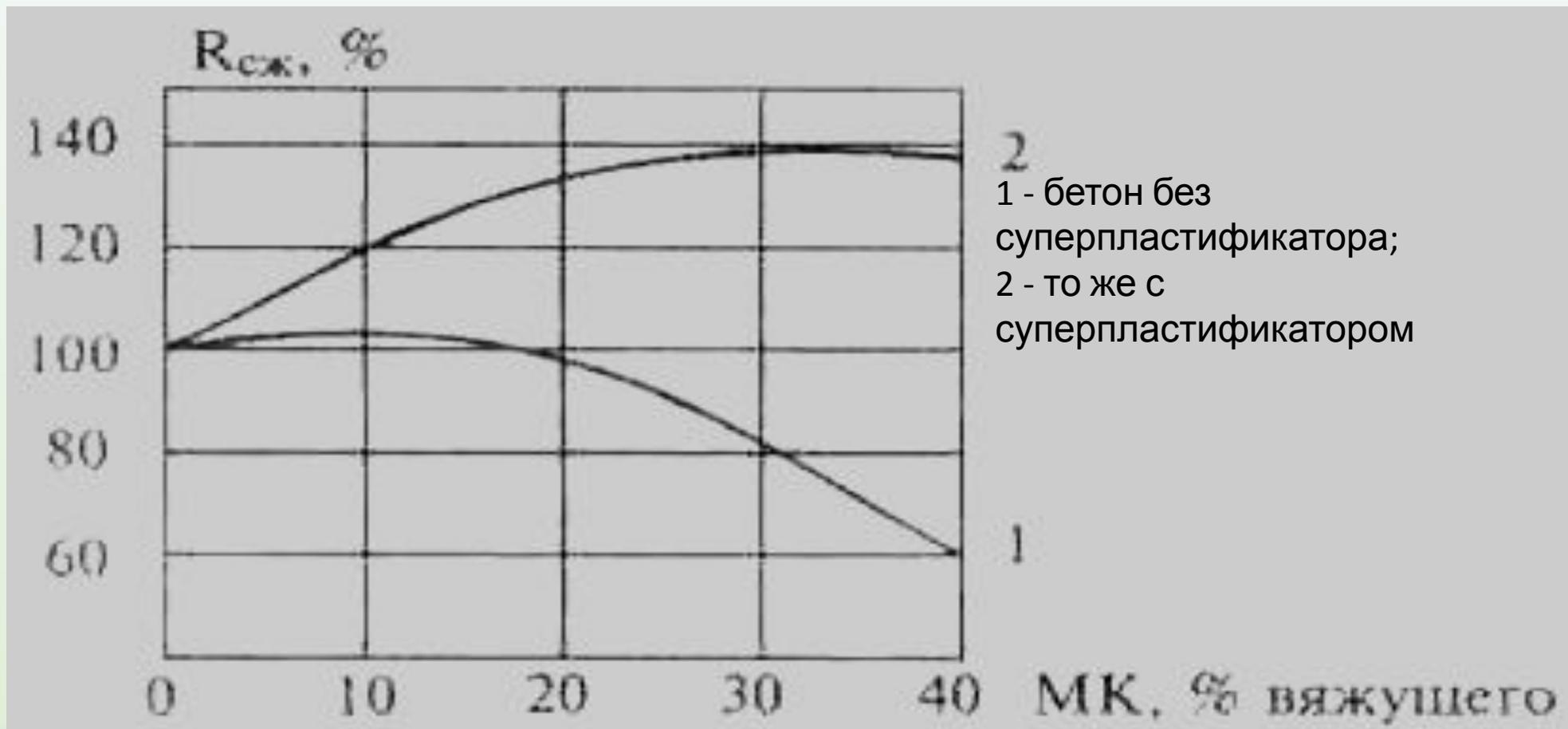
Микрокремнезем (МК) - порошок, состоящий из твердых сфер диаметром в среднем 0.1 мкм  
 Сравнение удельной поверхности микрокремнезема с портландцементом:

- микрокремнезем 140000-300000 см<sup>2</sup>/г
- портландцемент 3000-4000 см<sup>2</sup>/г



	2585	32,2	52,3	61,7
	2558	32,5	52,8	57,1
	2580	39,0	63,4	64,3
	2675	58,0	94,2	78,3
	2660	52,0	84,5	83,0
	2640	59,0	95,8	83,6
	2630	52,0	84,5	83,0

## Изменение прочности бетона в зависимости от количества замещенного микрокремнеземом цемента и пластифицирующей добавки

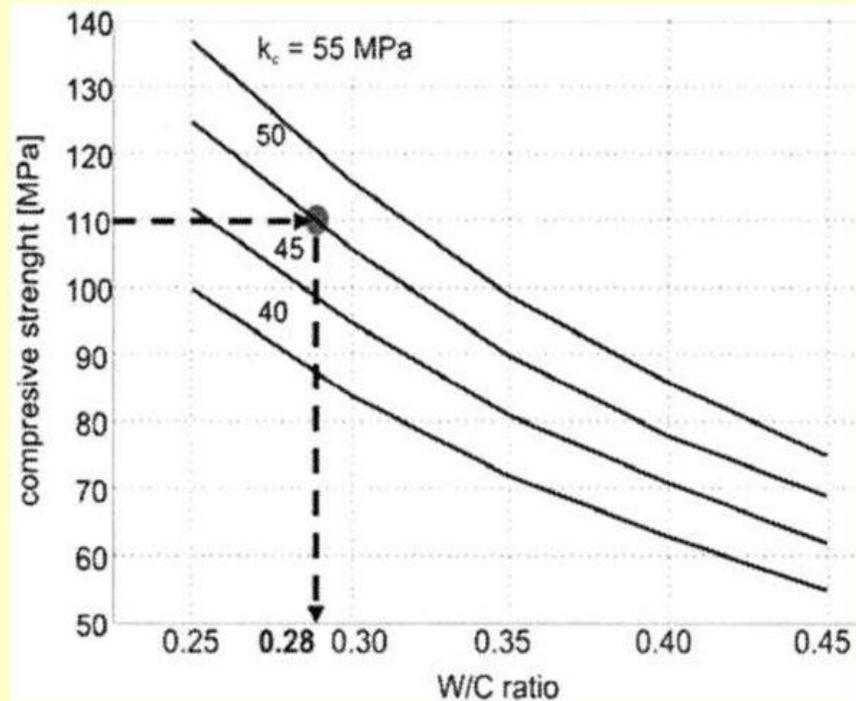


## Состав и свойства бетона УНРС

Рецептура смеси	+ МК	«О»		Прочность, МПа (Т тверд = 20°C)	
				+ МК	«О»
Nanodur CEM II/B-S 52,5 R	-	832			
CEM I 52,5 R-HS/NA	832	-	Призма 7 сут	122,6	125,2
Микрокремнезем (МК)	135	-	Призма 28 сут	154,1	154,1
Кварцевый порошок	207	288	Куб 7 сут	116,3	125,1
Песок	975	1056	Куб 28 сут	160,5	158,1
Вода	166	179	Прочность на разрыв		
Водоцементное отношение	0,22	0,24	Призма 7	15,4	20,7
Содержание СП в вяжущем	4,2%	4,2%	Призма 28	21,2	21,5

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

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>].



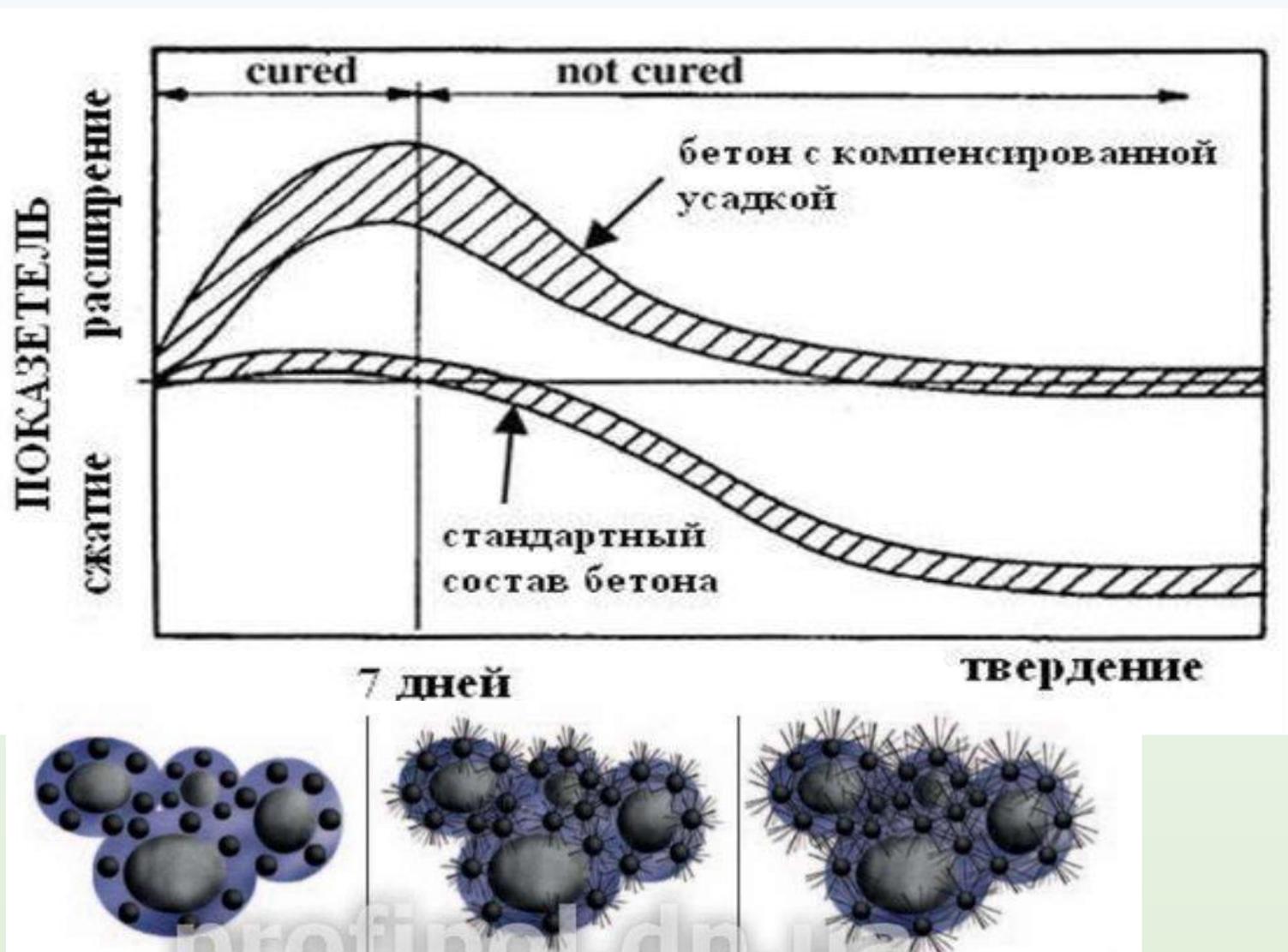
$$\text{Ц} = 400 - 500 \text{ [кг/м}^3\text{]}$$

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

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

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

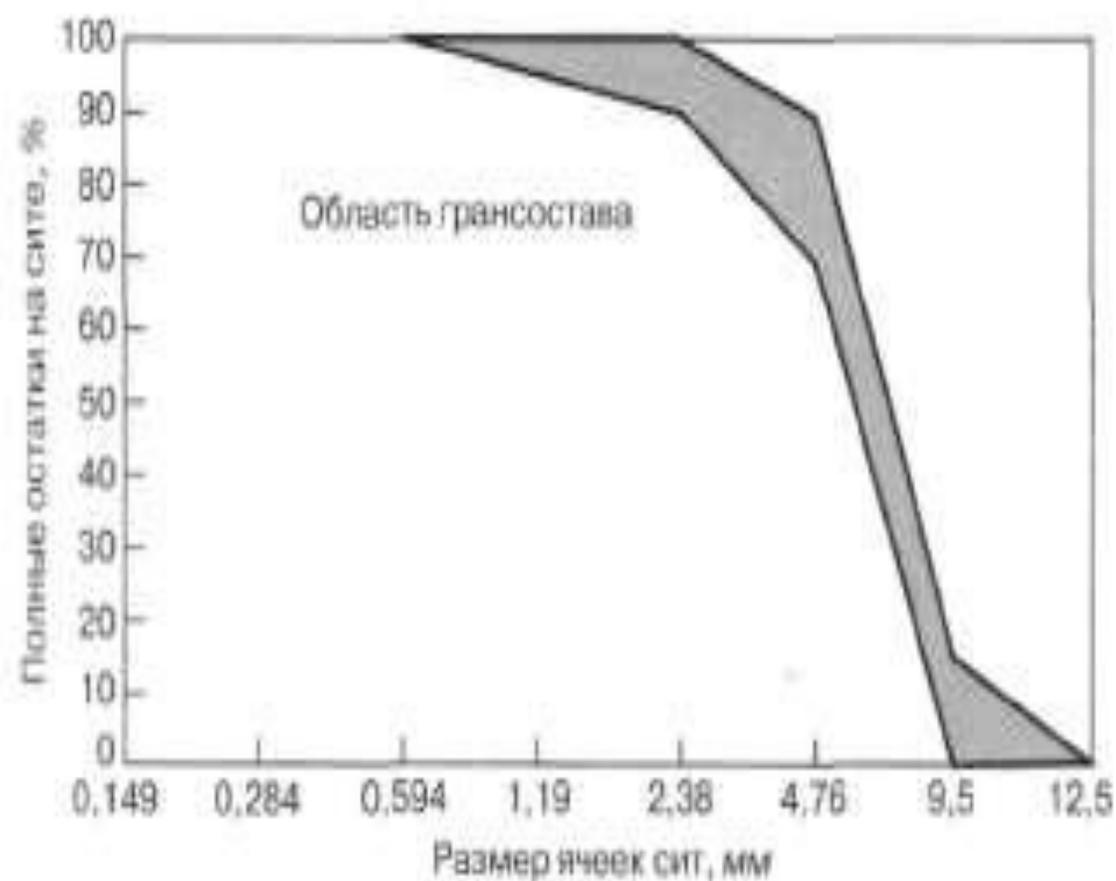
$$V_{\text{з}} = 1000 - V_{\text{ц}}$$



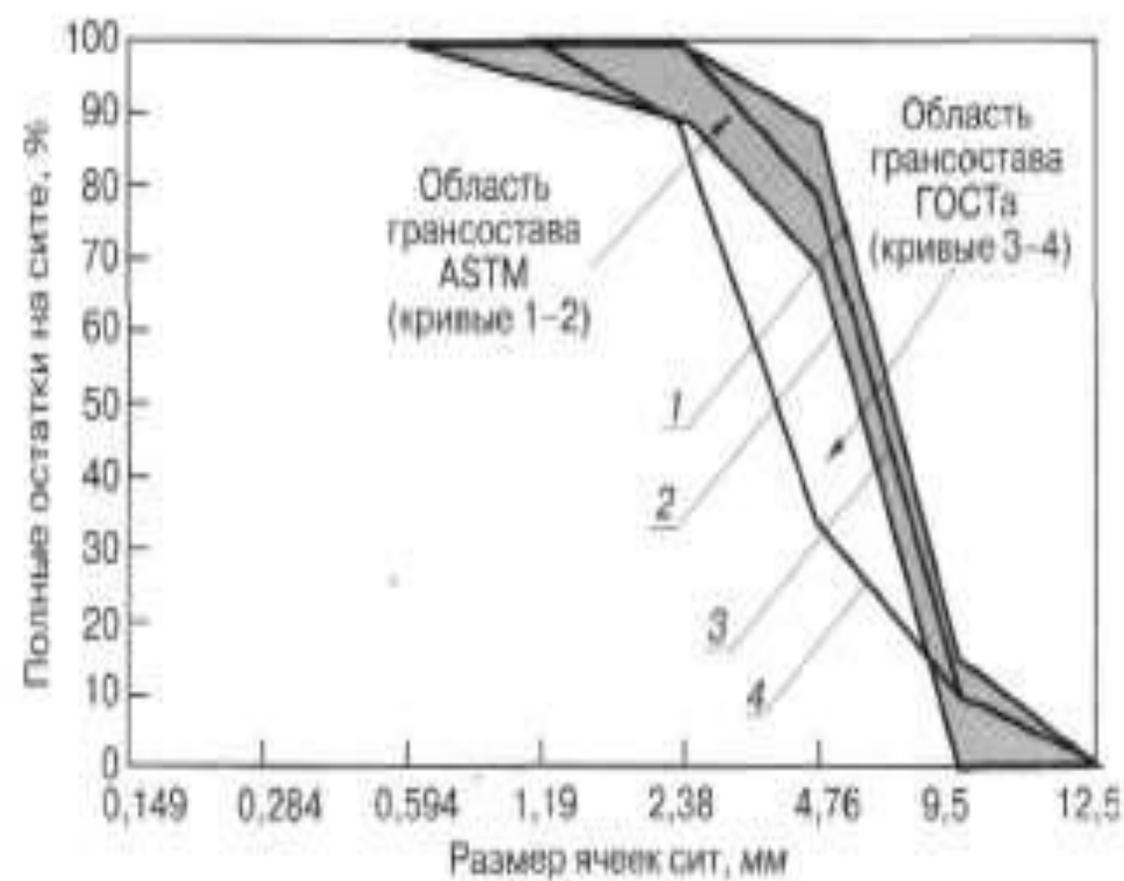
1- цемент с водой образуют «клей» вокруг зерен заполнителя, 2- начало кристаллизации на поверхности зерен цемента, 3- кристаллы срастаются друг с другом.  
 Бетон с компенсированной усадкой на основе ПЦ и расширяющейся добавки.

Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость. Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает деформации бетона под нагрузкой, а также ползучесть бетона - необратимые деформации, возникающие при длительном действии нагрузки. На ряду с механической прочностью и долговечностью крупного заполнителя его фракционный состав определяет ряд основных свойств бетона. Нормативной документацией регламентируется применение щебня определенной фракции.

В	Наибольшая крупность заполнителя, мм	Содержание ,% при размере фракций, мм				Й
		5...10	10...20	20...40	40...70	
	20	25...40	60...75	-	-	
	40	15...25	20...35	40-65	-	
	70	10...20	15...25	20-35	35-55	
<b>Примечание. Фракции размером &gt;70-120 мм отсутствуют.</b>						

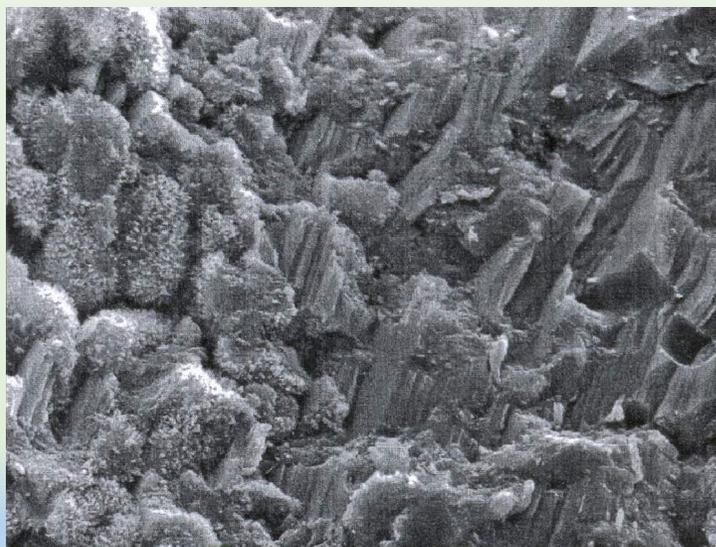
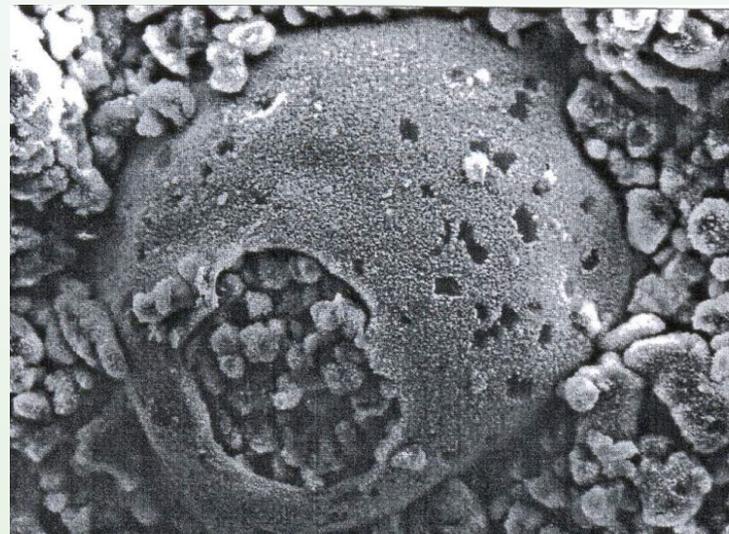
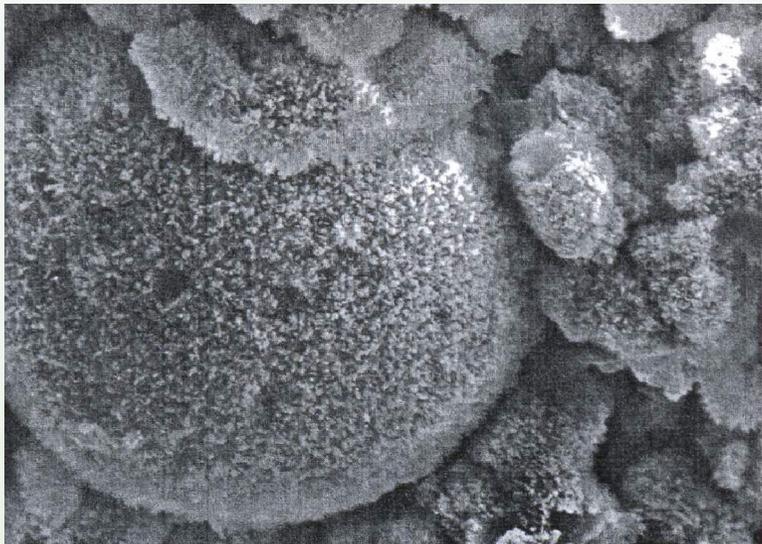


**Рис. II.2.3.** Область оптимального гранулометрического состава (полные остатки) крупного заполнителя класса В по ASTM для цементно-песчаных бетонов

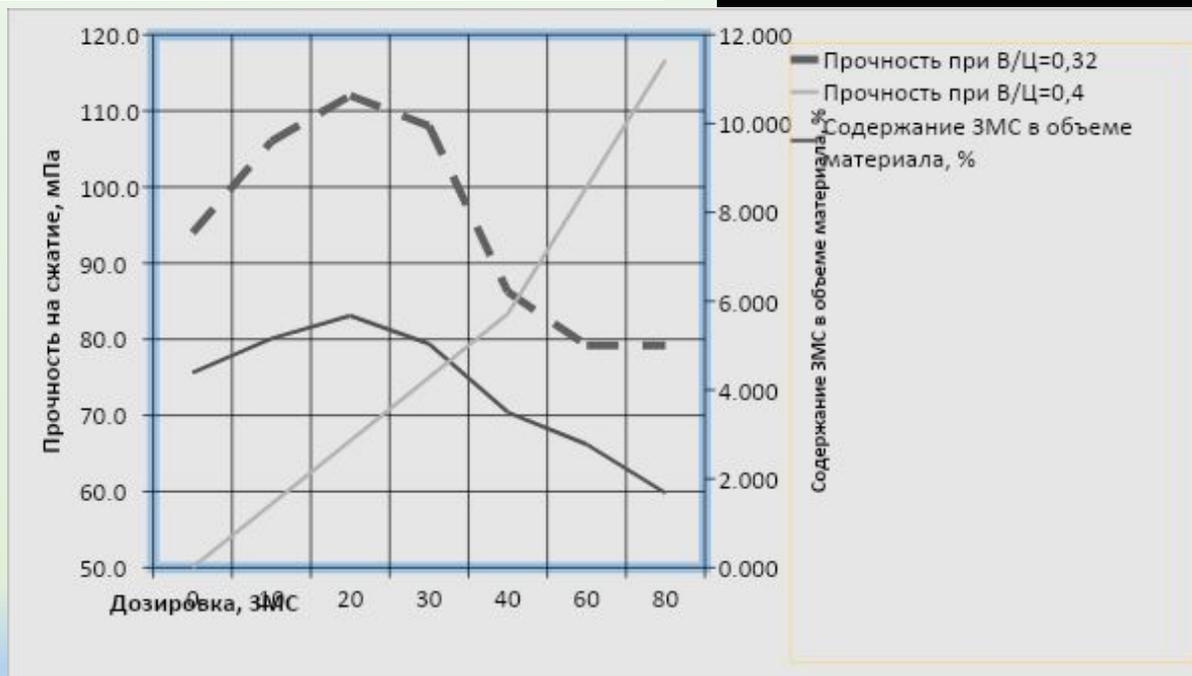
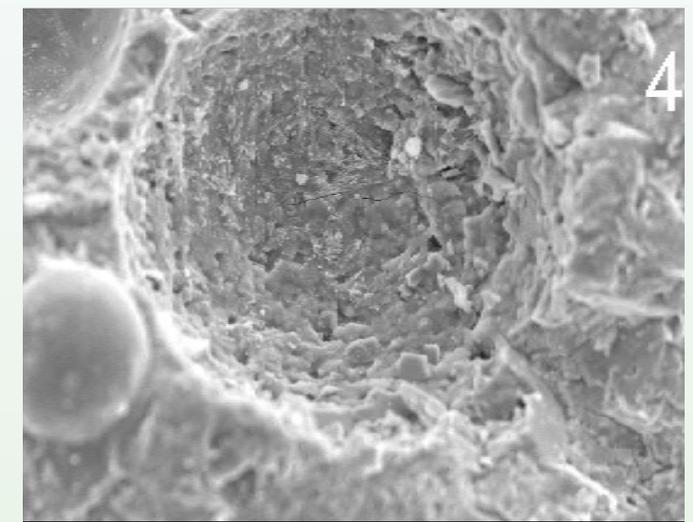
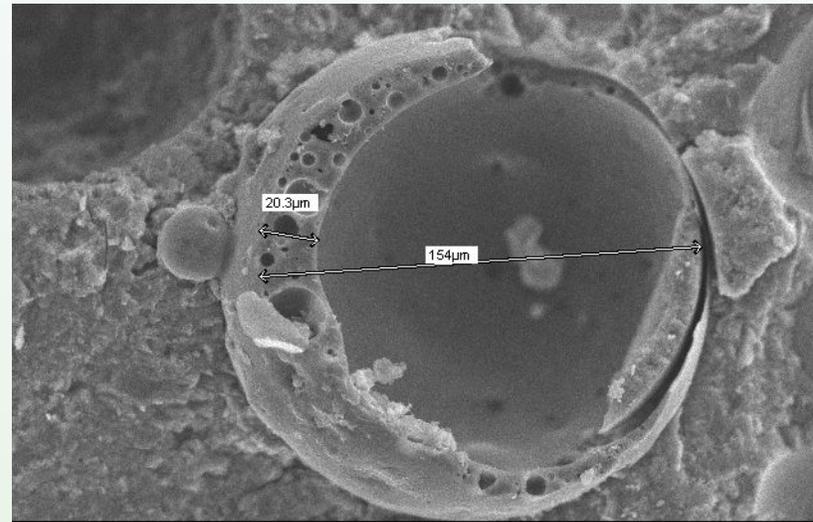
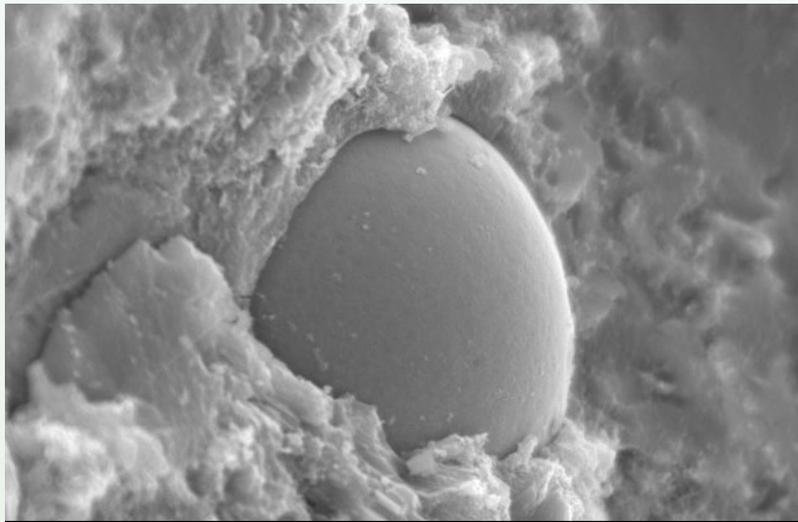


**Рис. II.2.4.** Совмещенный график гранулометрического состава крупного заполнителя фракции 9,5–10 мм по ГОСТу и ASTM

## Продукты гидратации на ЗМС

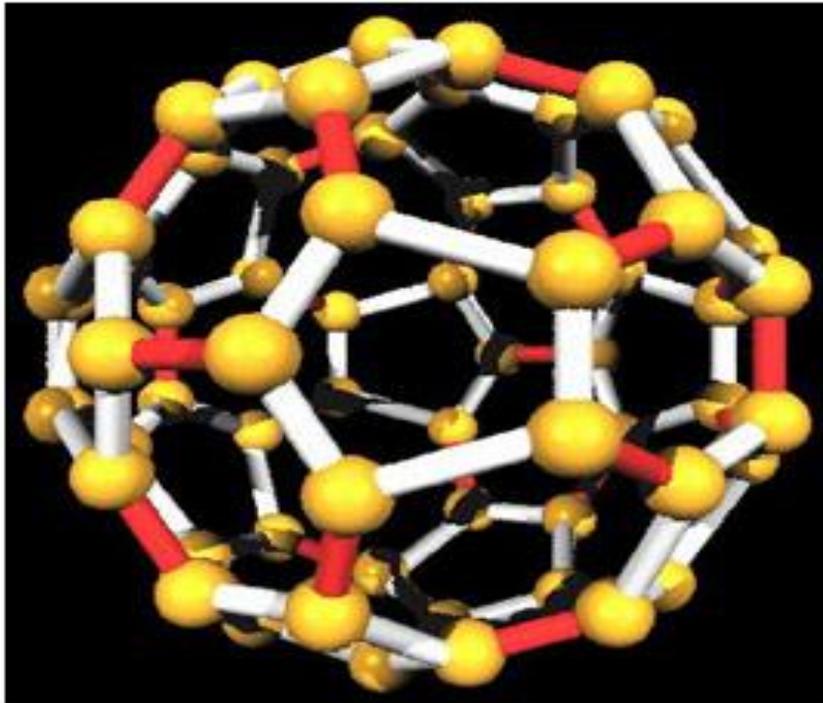


# Бетоны с зольными микросферами

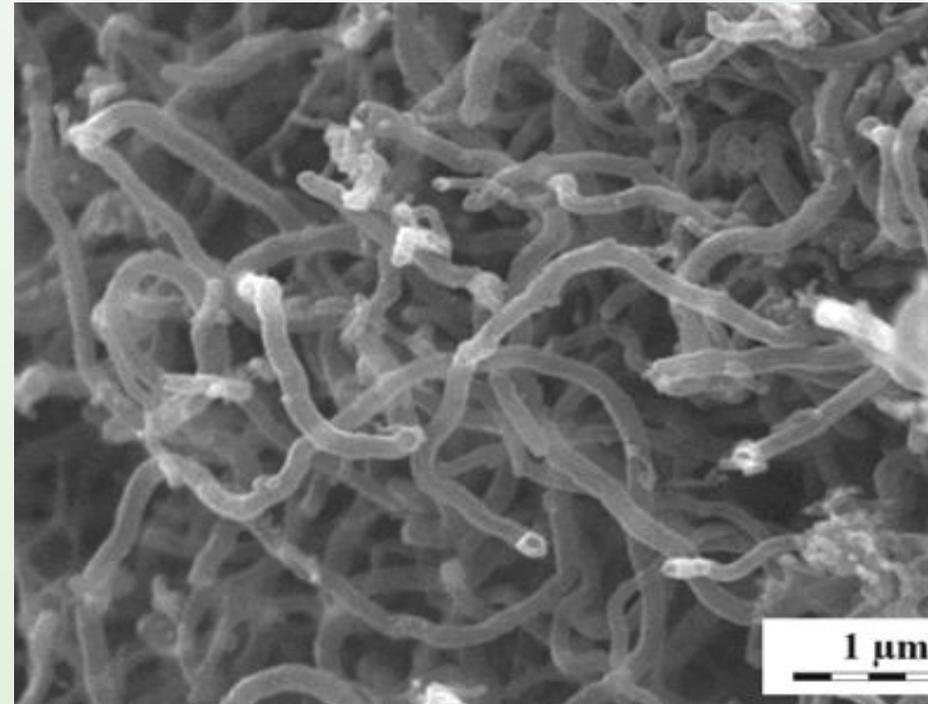


Результаты эксперимента позволили установить, что применение органоминеральной добавки ЗМС-МК-Д позволяет повышать прочностные характеристики бетона плотной структуры. Экспериментально подтверждена возможность получения бетона плотной структуры прочностью до 112 МПа.

Фуллерен  
C<sub>60</sub>



Электронно-микроскопический  
снимок  
углеродных нанотрубок



## Бетоны с ультрадисперсными кремнеземом

Характеристики материалов	Материалы			Обозначение состава	Прочность на сжатие, МПа (В/В=0,35)	
	ПЦ	МК	Нано-SiO <sub>2</sub>		В возрасте 7 сут.	В возрасте 28 сут.
Химический состав, %	22,0	95,0	99,9	О	38,26	44,64
SiO <sub>2</sub>	6,6	0,9	-	МК5	38,64	43,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	0,6	-	МК 10	40,22	47,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60,1	0,3	-	МК 15	41,61	50,47
CaO	3,3	0,9	-	S 3	38,87	47,85
MgO	2,1	0,5	-	S 6	40,19	50,67
SO <sub>3</sub>	2,6	2,1	0,1	S 9	43,76	51,37
Плотность	3,15	2,33	-	S 12	48,74	58,11
Средний размер частиц	43 мкм	0,1 мкм	40 нм			
удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	0,38	20	50			

## проблемы их производства

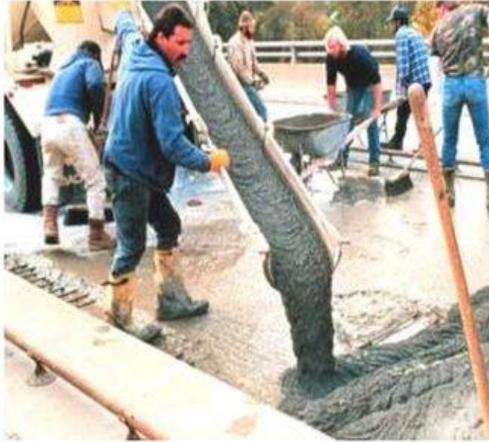
Достижения строительного материаловедения позволили объединить в единый комплекс положительные свойства разных групп бетонов. Так появился новый класс бетонов - высокофункциональные (НФС) бетоны. Это многокомпонентные бетоны, в которых используются композиционные вяжущие вещества, химические модификаторы структуры, свойств и технологии, активные минеральные компоненты и расширяющие добавки. Многокомпонентность системы позволяет управлять структурообразованием на всех этапах технологии.

- Имеющиеся на заводах стройиндустрии БСУ не позволяют организовать производство бетонных смесей с ультрадисперсными добавками, что могло бы позволить экономию до 20% вяжущего.
- Не решены вопросы изготовления бетонных смесей для производства работ в условиях низких отрицательных температур.
- Отсутствуют технологические участки для механоактивации вяжущего и смесей, хотя эффективность подобных приемов позволяет на 35-45% повышать прочность бетона без увеличения расхода вяжущего.
- Накопленный опыт по проектированию и производству наномодифицированных цементов и бетонов не может быть реализован по причине технической оснащенности бетонных узлов.
- Выпуск бетонов прочностью 40-50-60 МПа решается за счет увеличения расхода вяжущего, что не имеет технико-экономической целесообразности

## **Бетоны, со значительным набором функций:**

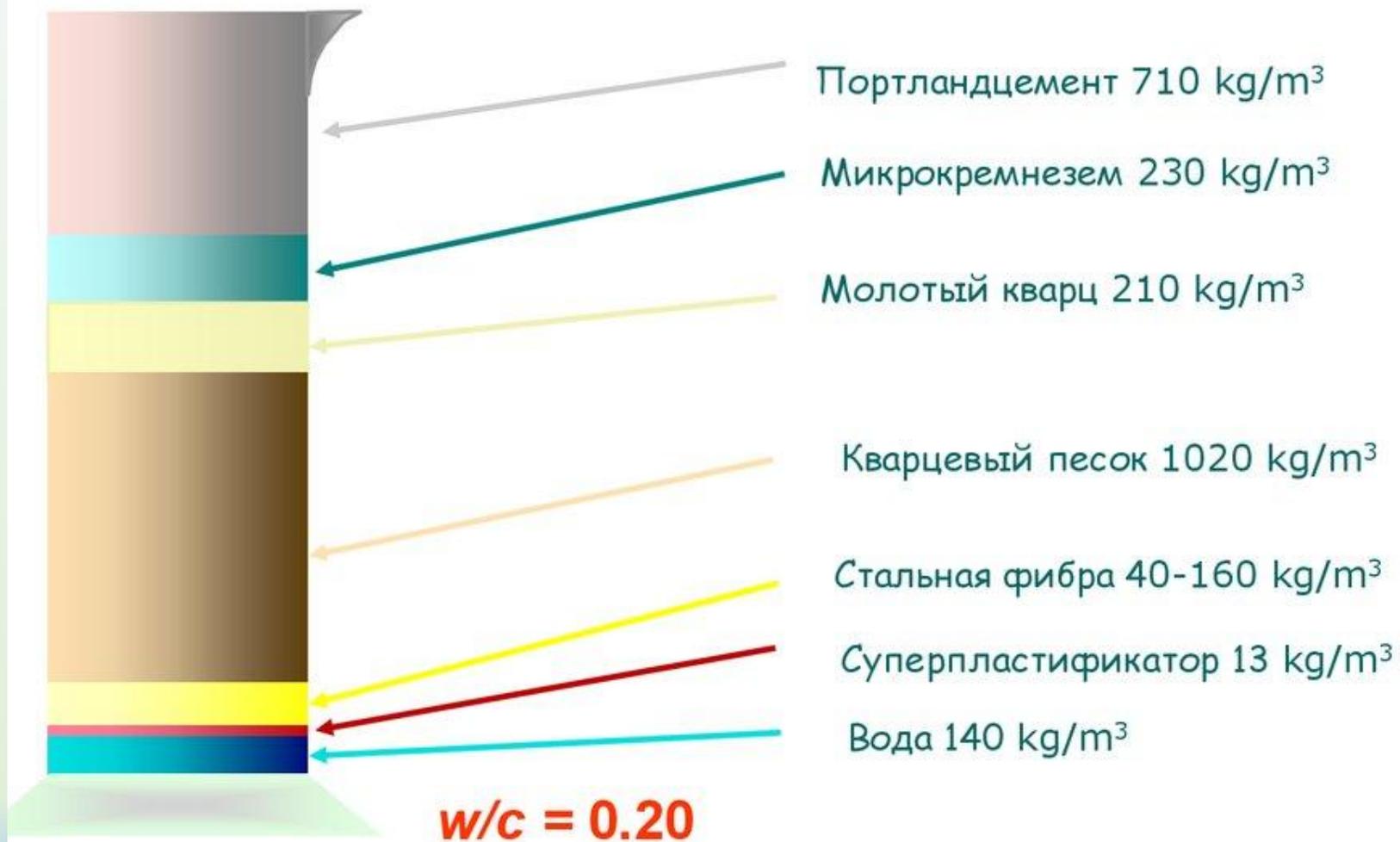
- High Performance Concrete – высокофункциональный бетон
- Defined Performance Concrete (с заданной функциональностью) аналог НРС
- Smart Materials Concrete («умные» бетоны),
- Self-regulated Concrete (саморегулируемые бетоны),
- Self Compacting Concrete (самоуплотняющиеся бетоны),
- Self Healing Concrete (самозалечивающиеся бетоны),
- Self Cleaning Concrete (самоочищающиеся бетоны),
- Self Sensing Concrete (самодиагностирующиеся бетоны).

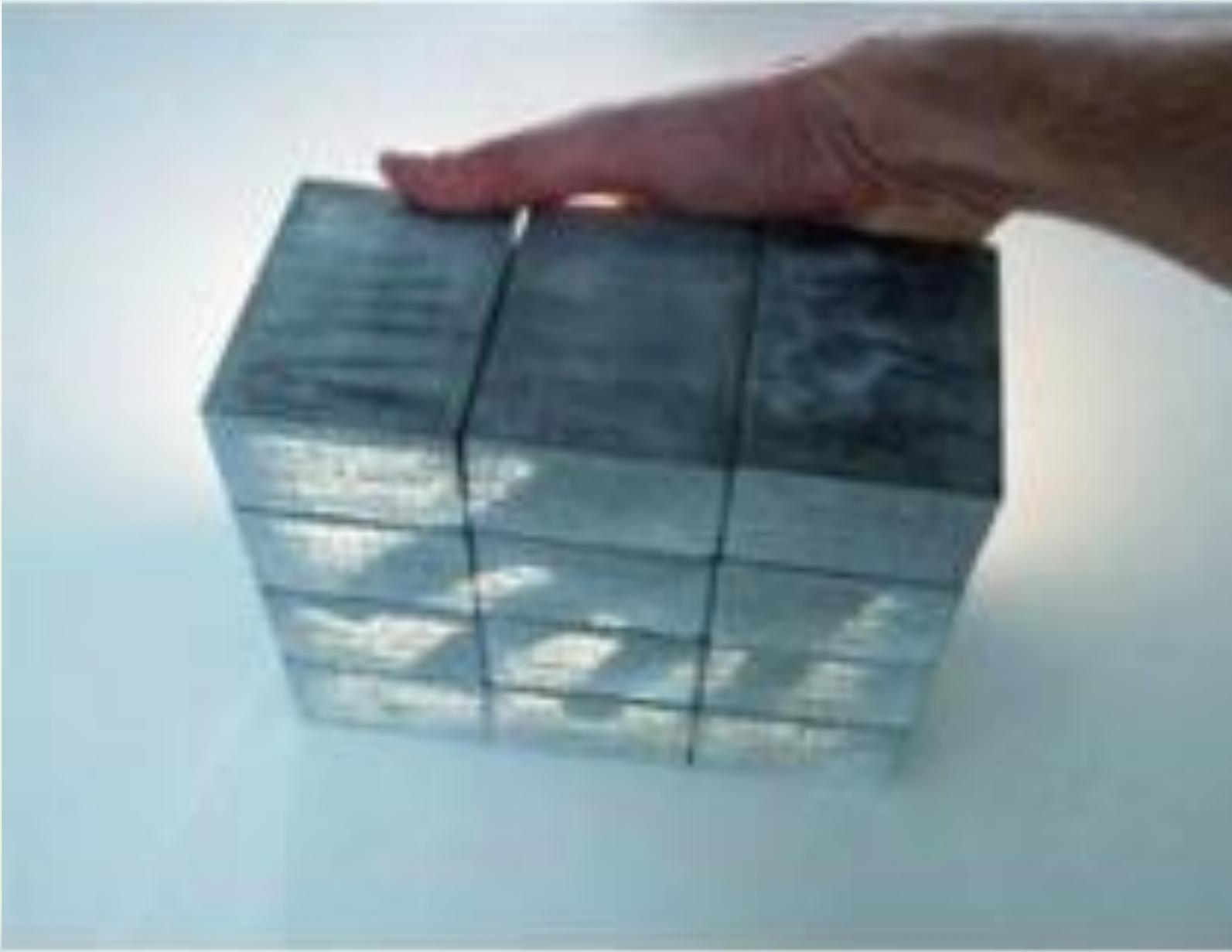
## *Self Compacting Concretes (SCC) – самоуплотняющиеся бетоны*



Самоуплотняющийся бетон (СУБ) – многокомпонентный бетон, 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 внешнего уплотняющего воздействия

# Состав реакционного порошкового бетона





**Бетон, который  
противостоит  
проникновению ионов  
соли.**

**Название нового  
метода VERDiCT (Viscosity  
Enhancers Reducing  
Diffusion in Concrete  
Technology), "технология  
снижения диффузии в  
бетоне при помощи  
вязкостного агента".**

1. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС». – 162 с.
2. EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity.
3. Калашников С.В. Тонкозернистые реакционно-порошковые дисперсно-армированные бетоны с использованием горных пород: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Пенза, 2006. – 22 с.
4. Richard P., Cheyrezy M.H. Reactive powder concrete with high Ductility and 200-800 MPa compressive strength // Concrete technology: Past, Present, and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, S. Francisco, 1994. P. 507-518.
5. Abbas S., Nehdi M. L., Saleem M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2016. Vol. 10, No. 3. P. 271–295.
6. Айчин П.-К. Первое сооружение из сверхпрочного бетона 15 лет спустя // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Науч. тр. III Всерос. (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. Т.7. С.7-14.
7. Gu C., Ye G., Sun W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives // Science China Technological Sciences. 2015. Vol. 58, Issue 4. P. 587-599.
8. Aitcin, P. C. High-performance concrete, London: E&FN SPON, 1998. – 591 p.
9. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. и др. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 9-13.
10. Суздальцев О.В., Калашников В.И. Высококачественные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны нового поколения на основе отходов камнедробления горных пород // V Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей: сборник докладов. – СПб.: Издательство «АлитИнформ», 2015. С.63-73.
11. Resplendino J., Toutlemonde F. The UHPFRC revolution in structural design and construction // Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Marseille, 2013. p. 791-804.
12. The Federal Highway Administration. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Publication No. FHWA-HRT-13-060, McLean, VA 22101-2296, 2013.
13. Cavill B., Chirgwin G. The world's first RPC road bridge Spepherds Gually Creek bridge, NSW // Proceedings of Fifth Austroads Bridge Conference. Hobart, Australia, 2004.
14. Bruhwiler E., Denarie E. Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fiber reinforced concrete // Proceedings of Second International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Kassel, 2008. P. 895-902.
15. Gu C., Zhao S., Sun W., et al. Production of precast UHPFRC pavement cover plates in high-speed railway construction / In Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Marseille, 2013. P. 463-470