



**eНано**  
ЭЛЕКТРОННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
ДЛЯ НАНОИНДУСТРИИ



**РОСНАНО**  
ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ  
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКТОРИЙ

**НАНОИНЖЕНЕРНЫЙ  
БЕТОН: НОВЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ В  
СОВРЕМЕННОМ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

6 ИЮНЯ 2017 Г.



# ОТКРЫТЫЙ ЛЕКТОРИЙ OPENAUDITORIUM.EDUNANO.RU



18 апреля 2017 года

Курьяков Владимир Николаевич

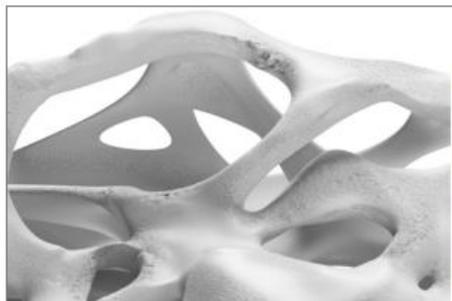
Измерение размеров наночастиц методом динамического рассеяния света. Теория и практика применения



28 марта 2017 года

Кузьмин Денис Владимирович

Разработка антимикробных препаратов нового поколения: кому и зачем это надо?



14 февраля 2017

Слияков Альберт Юрьевич и Новиков Антон Евгеньевич

Нанотехнологии в медицине: инновационные решения для лечения пациентов на примере костного цемента



**27**  
вебинаров в рамках  
проекта



**2**  
международные  
лекции с онлайн  
трансляцией



**более 5500**  
просмотров на канале  
YouTube



Доктор **КОНСТАНТИН СОБОЛЕВ**,

профессор и декан кафедры гражданского инжиниринга и охраны окружающей среды колледжа инженерных и прикладных наук, Университет Висконсин-Милуоки (США)

### **Цели и задачи вебинара:**

- Выявить потенциальные возможности наноинженерного бетона;
- Подобрать наиболее оптимальный метод производства и наиболее эффективные области применения бетона с применением наночастиц и фибр;
- Провести сравнительную характеристику свойств наночастиц/нанофибр в бетоне;
- Провести анализ существующих гипотез и всеобщих заблуждений относительно нанотехнологий в бетоне;
- Выявить возможный экологический риск применения наноматериалов в бетоне.

- Вопросы докладчикам можно задавать по ходу вебинара во вкладке ВОПРОСЫ
- По техническим и другим вопросам вебинара просьба пользоваться вкладкой ЧАТ
- Просьба к организациям-участникам указать число участников вебинара в студии во вкладке ЧАТ
- Запись «Открытого лектория» вы найдете на нашем сайте:  
[OPENAUDITORIUM.EDUNANO.RU](http://OPENAUDITORIUM.EDUNANO.RU)
- Уважаемые коллеги, обращаем ваше внимание, что вы сможете получить ответы на вопросы, если обратитесь по почте: [ENANO@RUSNANO.COM](mailto:ENANO@RUSNANO.COM)

# НАНОИНЖЕНЕРНЫЙ БЕТОН:

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Константин Соболев**

PhD, FACI, AMC

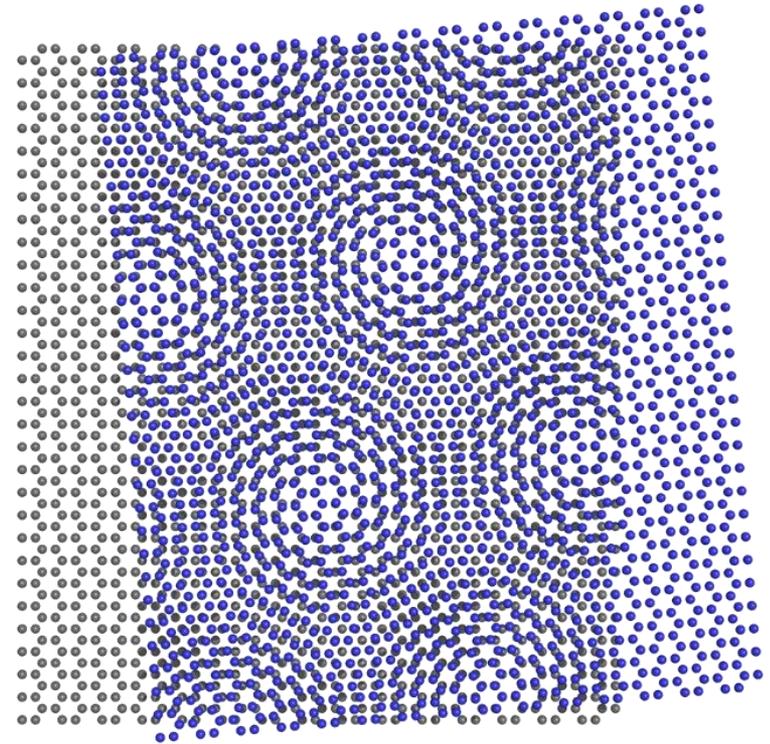
*Профессор, Университет Висконсин-Милуоки – UWM*

*Академик, Мексиканская Академия Наук - AMC*

*Вице-президент, Сообщество Нанотехнологии и Нанонауки в Бетоне - CNNS*

*Председатель, Комитет ACI 241, Нанотехнологии в бетоне, Американский Институт Бетона - ACI*

*Председатель, Комитет Бетонных Материалов с Использованием Нанотехнологий, AFN10 - TRB*



**CNNS**



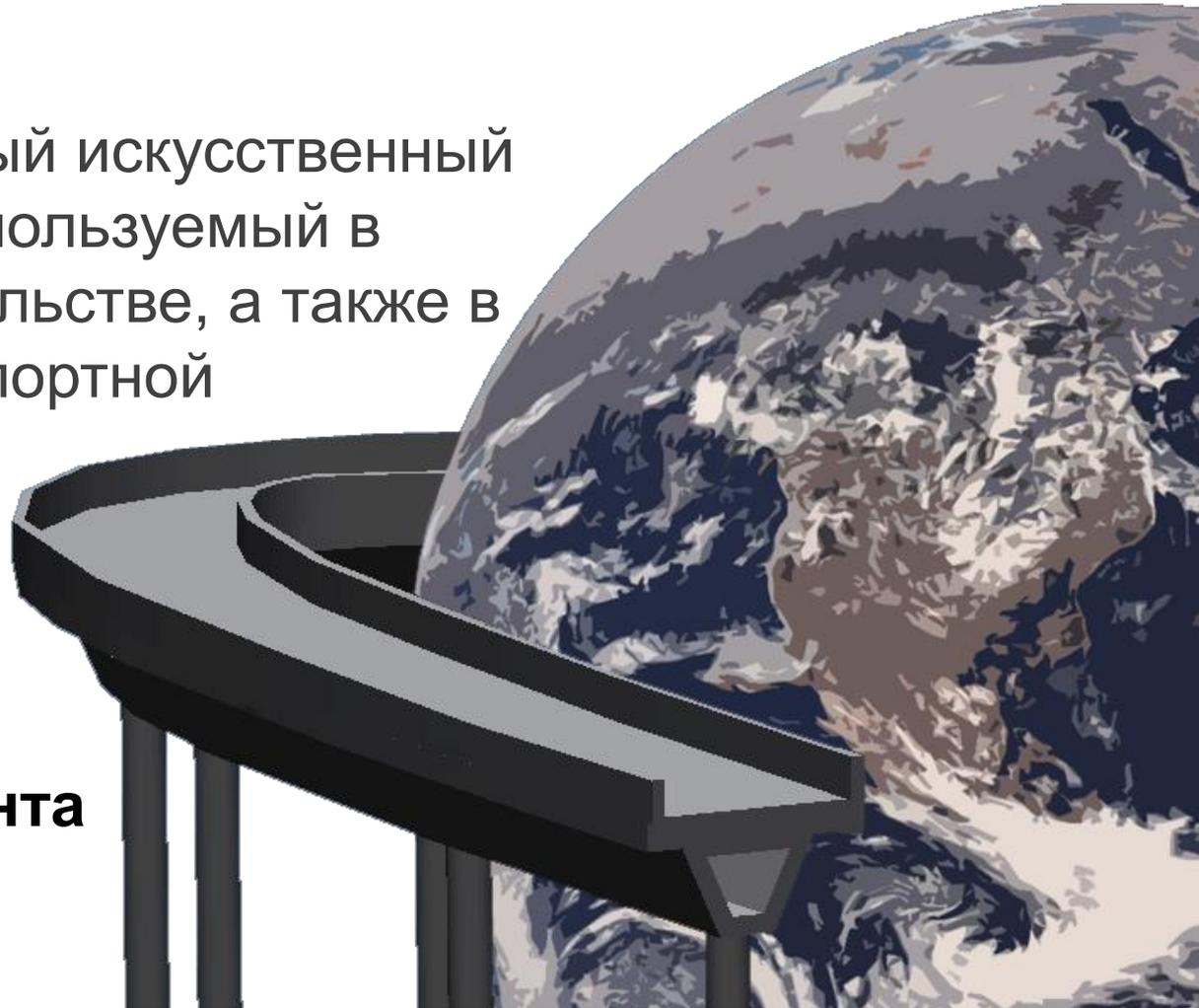
# СОДЕРЖАНИЕ

- Введение
  - Задачи современного бетоноведения
  - Почему нужны нанотехнологии в бетоне?
- Супергидрофобный бетон
- Наночастицы в композитах на основе цемента
- Нано-вяжущие?
- Механо-химическая активация цемента
- Применение активированной золы-уноса в СУБах
- Заключение

# ПОЧЕМУ БЕТОН?

Это самый популярный искусственный материал широко используемый в гражданском строительстве, а также в строительстве транспортной инфраструктуры

**Ежегодное мировое производство цемента составляет 4,3 миллиарда тонн**



# ПОЧЕМУ НУЖЕН БЕТОН, СОЗДАННЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ?

Бетон – это самый широко используемый искусственный многофазный, наноструктурированный композит, который изнашивается со временем.

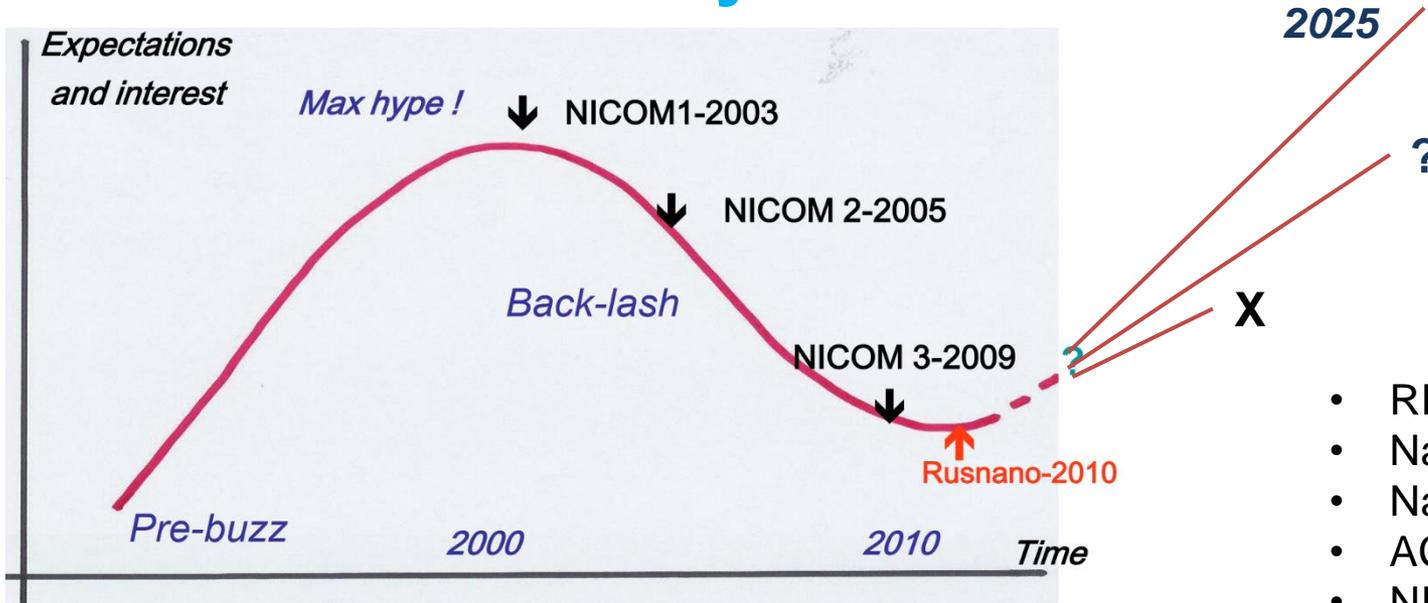
Свойства бетона напрямую зависят от деградационных процессов, протекающих на всех размерных уровнях (от нано- к микро- и макроуровням), где свойства на каждом уровне влияют на каждый последующий в порядке от низшего к высшему.

Аморфная фаза и C-S-H служат в качестве «клея», который скрепляет все компоненты бетона. Этот «клей» представляет собой наноматериал.

# ПОЧЕМУ НУЖНЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ?

- Повышение прочности и долговечности
- «Эко»-бетон:
  - Снижение потребления сырьевых материалов
  - Достижение прочностных показателей при меньшем потреблении сырьевых материалов
  - Эффективное использование вспомогательного минерального сырья, обладающего вяжущими свойствами
- Снижение энергопотребления
- Сокращение выбросов CO<sub>2</sub>
- Развитие новых «функциональных» свойств или комбинирование «традиционных» свойств с новыми:
  - Электрические и магнитные свойства
  - Термическая проводимость
  - Супергидрофобные свойства
  - Фотокаталитические и фотоэлектрические свойства
  - «Умный» бетон
  - Бетон с самозалечивающимися свойствами

# Этапы Большого Пути



The 'S-curve' of perception: Nanotechnology

after Peter J M Bartos, 2010



Search the ACI Site...

Publications	Certification	Education	Committees	Events	Chapters	Topics in Concrete	ACI Store
--------------	---------------	-----------	------------	--------	----------	--------------------	-----------

Home > Committees > Directory of Committees > A Committee Home

## Committee Home

### 241 - Nanotechnology of Concrete

[Modify Committee Home](#)

**Committee Mission:** Develop, report, and disseminate information on the impact of nanotechnology and nanomaterials on the performance and durability of concrete.

**Chair:** Konstantin Sobolev

**TAC Contact:** Kimberly Kurtis

**Active Committee Documents:**

- 241R-17: Report on Application of Nanotechnology and Nanomaterials in Concrete

[See all 241 Committee Documents...](#)

[Email Members »](#)   [Committee Roster »](#)

**241 SUBCOMMITTEES (1)**  
[241-0A - The Application and Implementation of Nano-Engineered Concrete](#)

**241 TASK GROUPS (1)**  
[241-TG1 - Dispersion of Nanoparticles In Concrete Materials TG](#)

- RILEM TC197 2002-08
- Nanocone 2003-04
- Nanocem 2005
- ACI 236D 2005-15
- NICOM 1 2003
- NICOM 2 2005
- NICOM 3 2009
- Rusnano RT 2010
- TRB-1 2010
- NICOM 4 2012
- ACI 241 2014
- NICOM 5 2015
- CNNS 2015
- ACI 241 Report 2017
- MGSU-ICNNC 2017
- NICOM 6 2018
- TRB-2 2020

# Этапы Большого Пути



American Concrete Institute  
*Always advancing*

Search the ACI Site...

Search

Publications

Certification

Education

Committees

Events

Chapters

Topics in Concrete

ACI Store

Home > Store > ProductDetail



## 241R-17: Report on Application of Nanotechnology and Nanomaterials in Concrete

Your Price: **\$29.00** USD

Non-member Price: \$49.50 USD

You Save \$20.50 USD

### CHOOSE PRODUCT FORMAT

- PDF
- ePub
- Kindle

ADD TO CART

### Related Products



On-Demand Course:  
Concrete under the  
Nanoscope



SP-254:  
Nanotechnology of  
Concrete: Recent  
Developments and  
Future Perspectives



SP-267:  
Nanotechnology of  
Concrete: The Next Big  
Thing is Small CD



Need Help?  
Email Support

# МУЛЬТИ-РАЗМЕРНЫЙ КОМПЗИТ

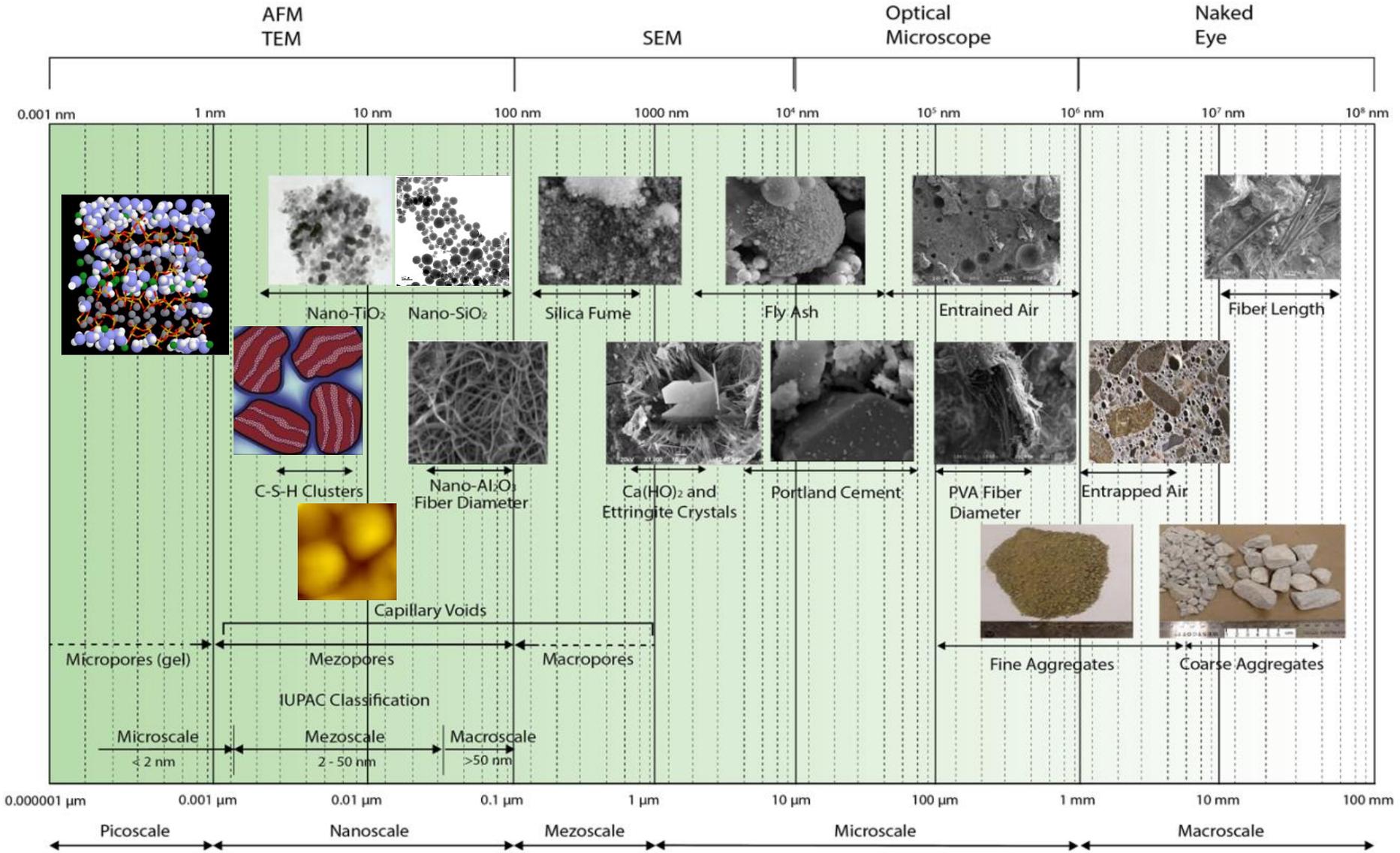
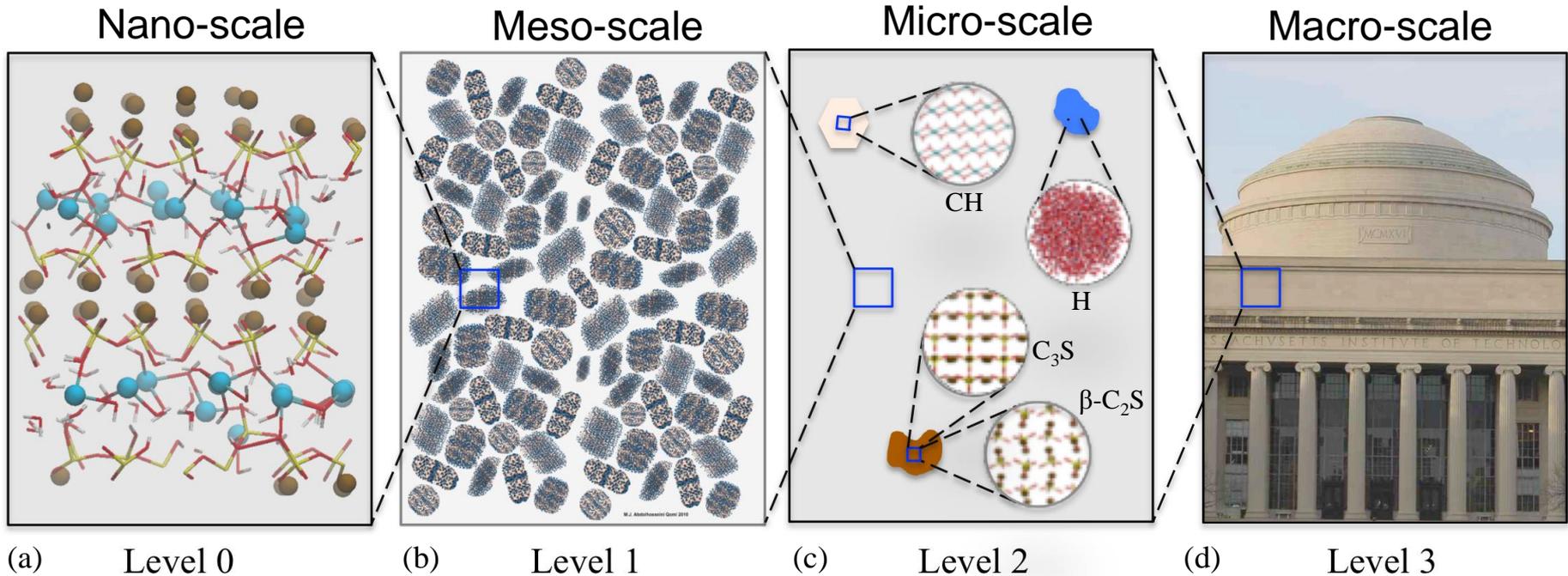


Fig. 3. The scale ranges related to concrete, after [16]

# CSH - МУЛЬТИРАЗМЕРНЫЙ КОМПЗИТ



Hydration reaction of pure cement clinkers:



where **C**, **S** and **H** are **CaO**, **SiO<sub>2</sub>** and **H<sub>2</sub>O** is cement Chemistry notation.

Reactants:

C<sub>3</sub>S: alite (crystalline)

C<sub>2</sub>S: belite (crystalline)

Products:

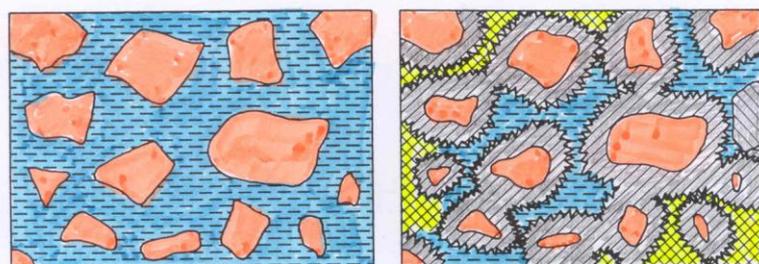
CH: portlandite (crystalline)

CSH: calcium silicate hydrate

(crystalline or amorphous ...)

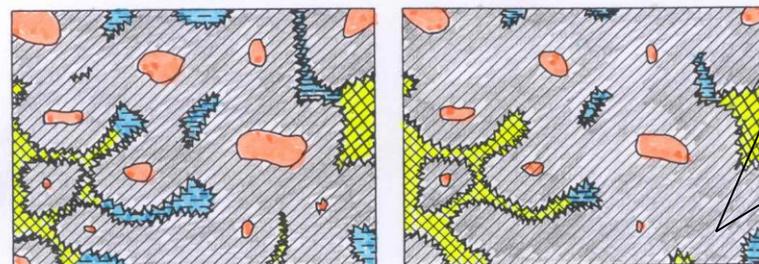
# ГИДРАТАЦИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА НА НАНОУРОВНЕ

## Процесс гидратации



(a)

(b)



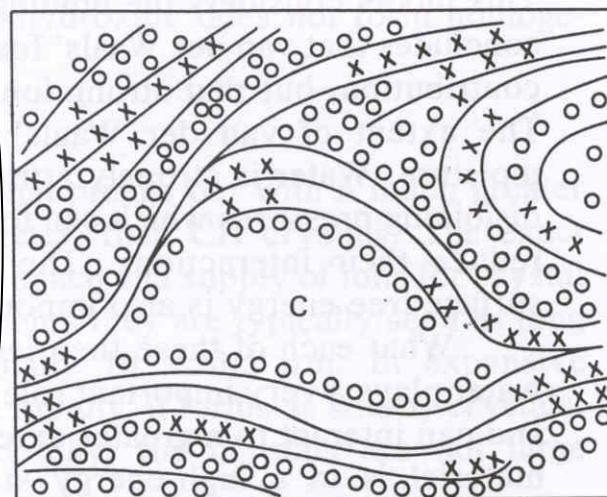
(c)

(d)

20  $\mu\text{m}$



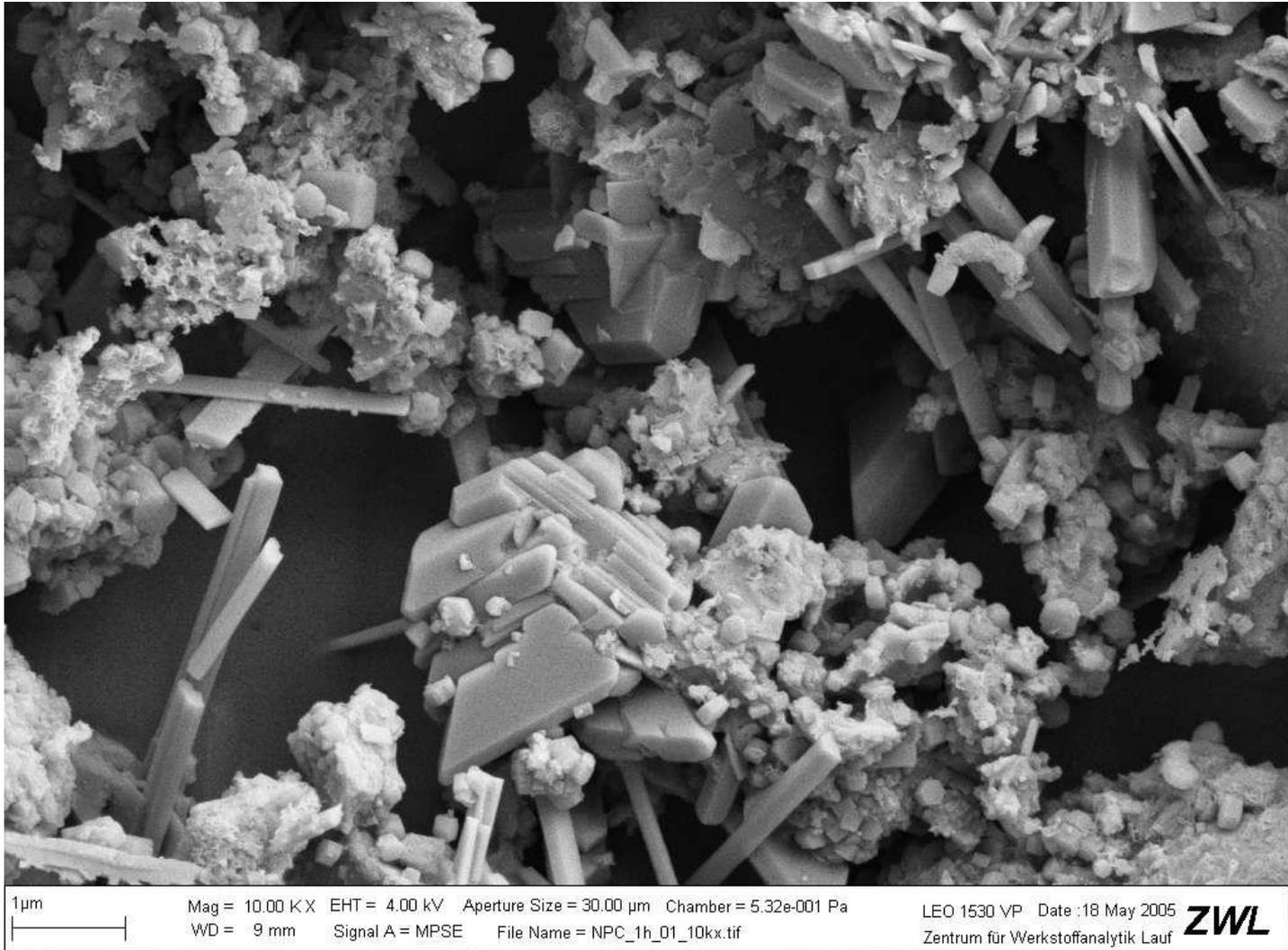
## Гель C-S-H



x структурная вода    o адсорбционная вода  
с капиллярные поры    — слои C-S-H

Все производные свойства являются свойствами наноструктуры

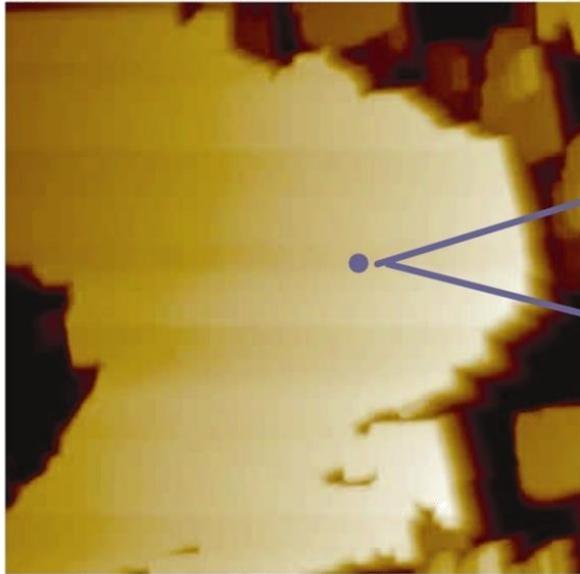
# ГИДРАТАЦИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА



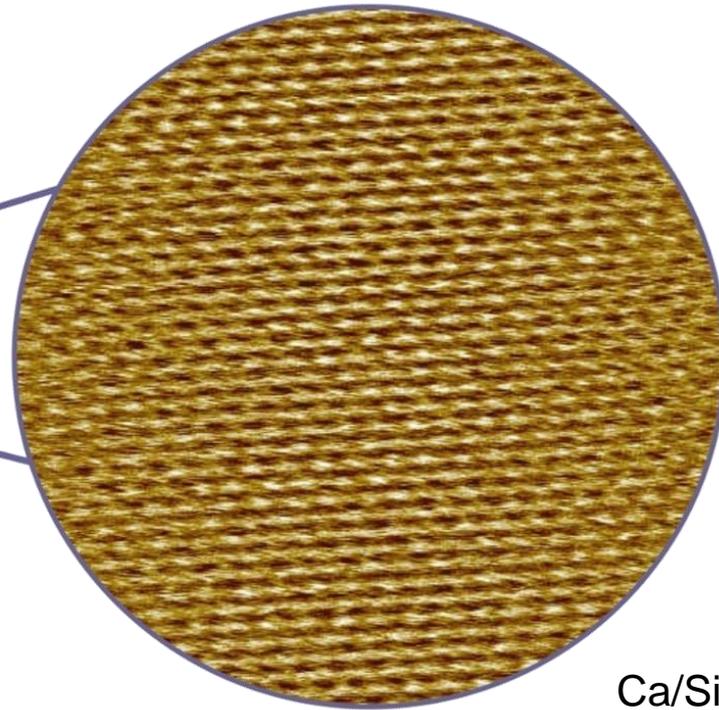
Изображение структуры цементной пасты после 1 часа гидратации

# НАНОСТРУКТУРА ГЕЛЯ C-S-H

C-S-H crystallized  
 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$



Atomic resolution  
 $20 \times 20 \text{ nm}^2$

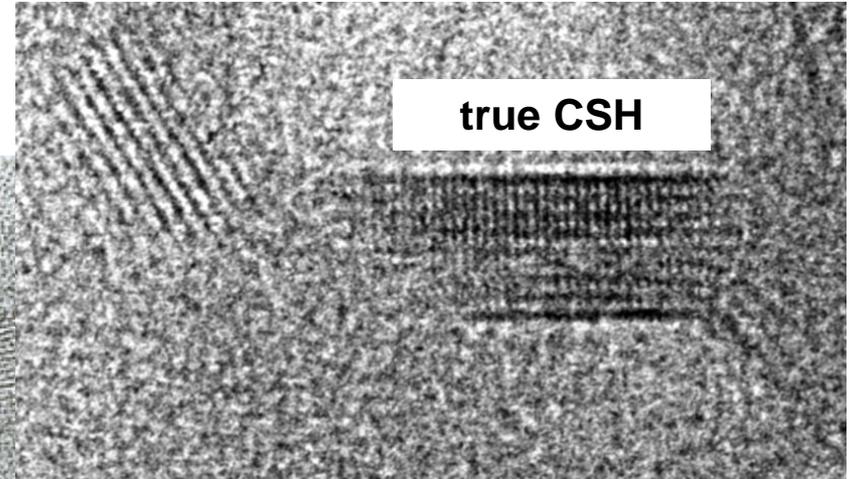
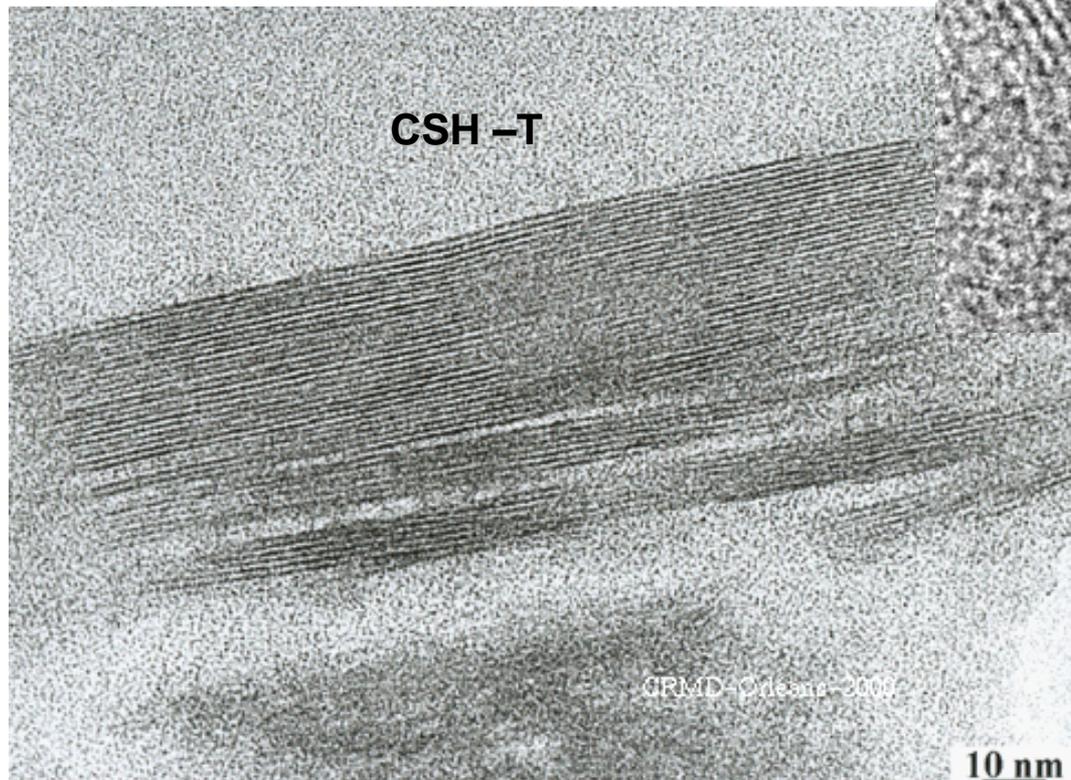


Zoom

*The application of AFM for the investigation of the “amorphous” C-S-H gel structure discovered that at nanoscale this product has a highly ordered structure (after C. Plassard et al.).*

# C-S-H ГЕЛЬ ПОД ПЭМ

$$\text{Ca/Si} = \text{C/S} = 0.9$$

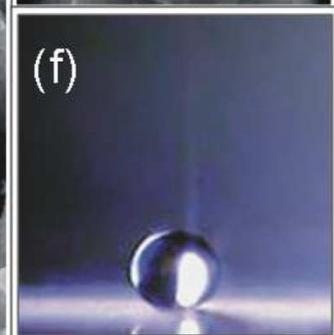
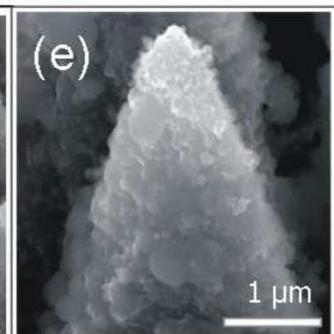
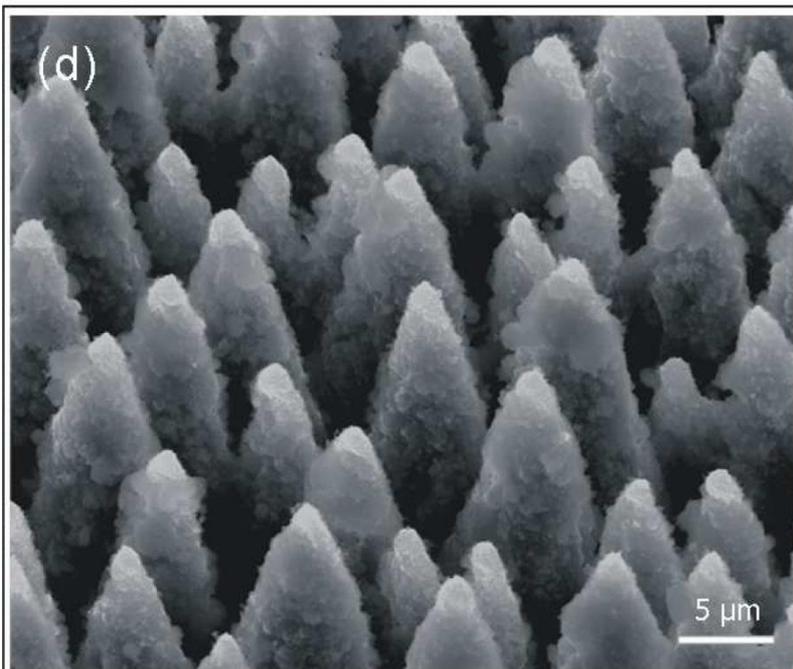
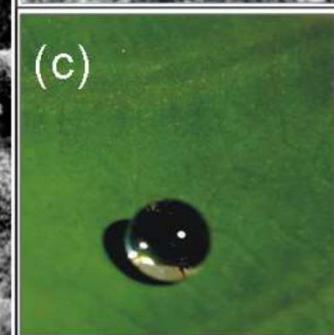
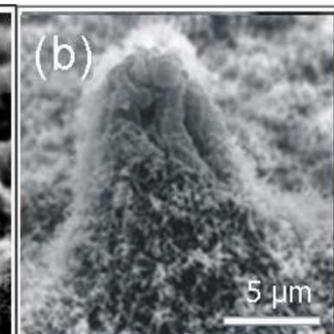
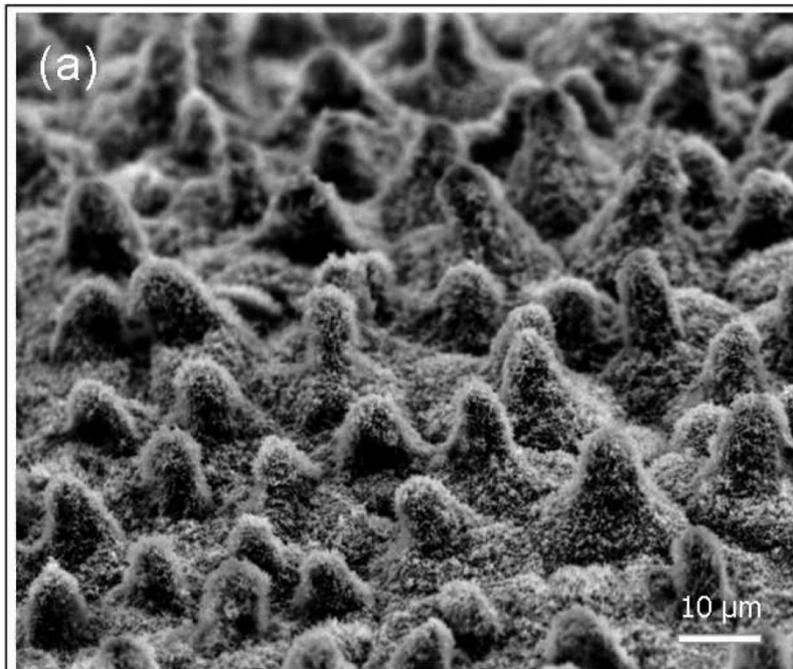
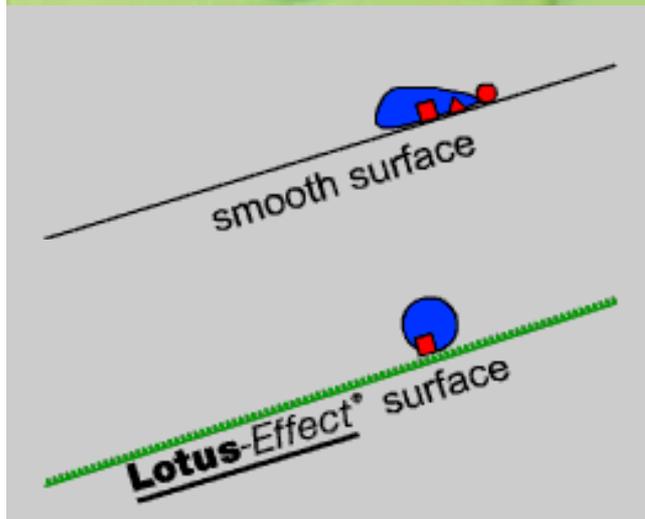


Слоистая структура

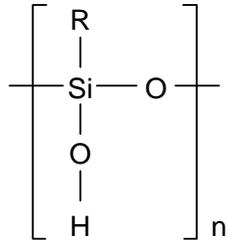
# ЧТО ТАКОЕ НАНОИНЖЕНЕРНЫЙ БЕТОН?

- Исследование и определение количественных характеристик / фаз бетона на наноуровне;
- Разработка бетона, используя мульти-размерный подход;
- Получение наночастиц и нанопорошков, используя подходы «сверху-вниз» и «снизу-вверх»;
- Получение бетонных материалов с использованием нанодисперсных компонентов, обладающих вяжущими свойствами;
- Разработка наноразмерных зародышей / затравок C-S-H с целью ускорения гидратационных процессов;
- Модификация поверхностей;
- Прочее?

# СУПЕР-ГИДРОФОБНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ



# ПРЕДЛОЖЕННЫЙ МЕТОД



R = CH<sub>3</sub> or C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>

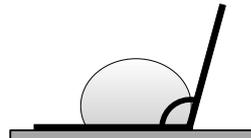
Chemical structure of PEHSO/PMHS



Hydrophilic surface:

$$\Theta < 30^\circ$$

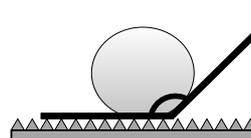
(normal concrete)



Hydrophobic surface:

$$90^\circ < \Theta < 120^\circ$$

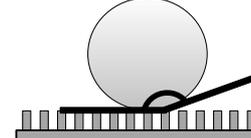
(concrete with PEHSO/PMHS)



Overhydrophobic surface:

$$120^\circ < \Theta < 150^\circ$$

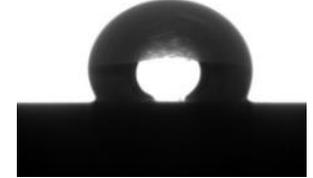
(concrete with PEHSO/PMHS & micro particles)



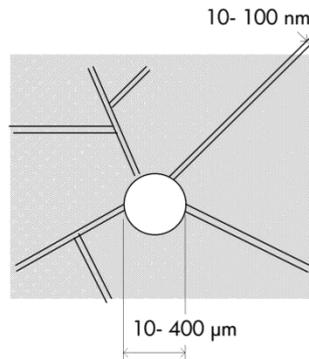
Superhydrophobic surface:

$$\Theta > 150^\circ$$

(concrete with PEHSO/PMHS, micro & nano particles)

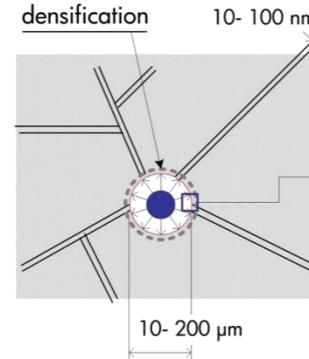


Работы, проводимые в университете Висконсин-Милуоки продемонстрировали возможность супергидрофобной гибридации бетона. Супергидрофобная гибридация подразумевает использование междисциплинарных знаний и подходов включающих биомиметику (эффект Лотоса), химию (кремнийорганические соединения) и нанотехнологии (частицы нанокремнезема) с целью решения фундаментальных задач бетоноведения, таких как недостаточная долговечность и коррозионная стойкость армирующих элементов.



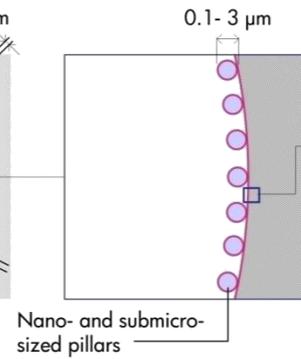
AE admixture:

- random distribution
- uncontrolled structure
- air loss
- strength reduction
- hydrophilic surface



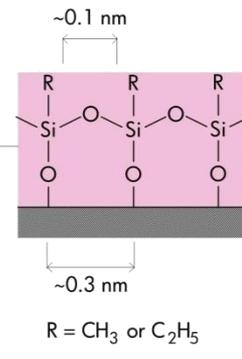
PEHSO admixture:

- controlled size distribution
- precise spacing factor
- no strength reduction
- no shrinkage
- hydrophobic surface



Engineered superhydrophobic pore surface

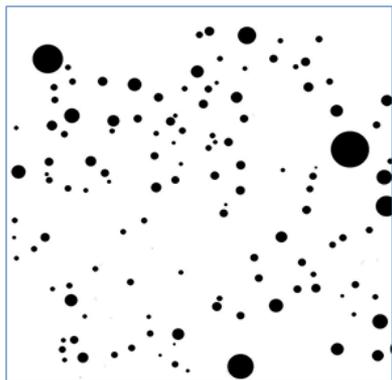
(proposal)



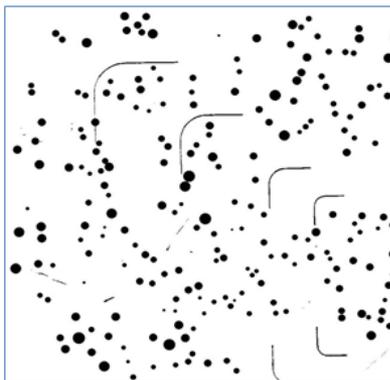
Self-assembly of hydrophobic 2D network on the pore/pillar surface

# ЭМУЛЬСИИ И СТРУКТУРА ВОЗДУШНЫХ ПОР

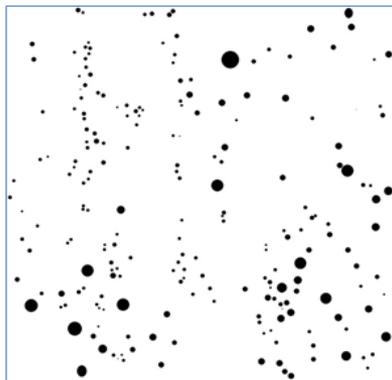
Микрофотографии эмульсий с темными глобулами представляют фазу силоксана:



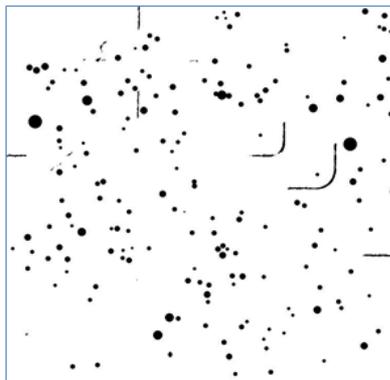
2.2% PVA Surfactant, 1000rpm



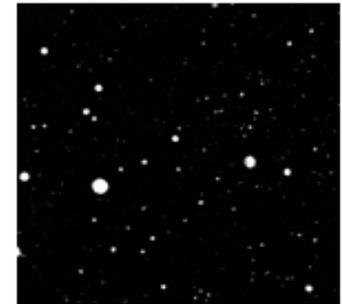
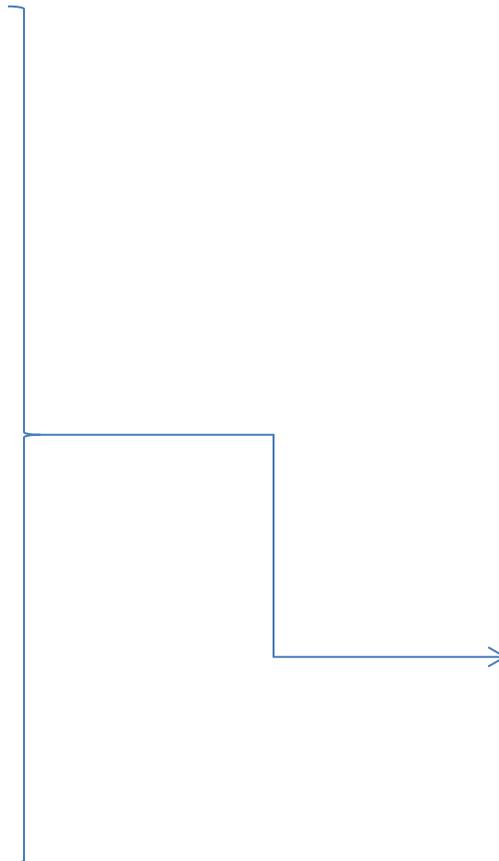
4.4% PVA Surfactant, 1000rpm



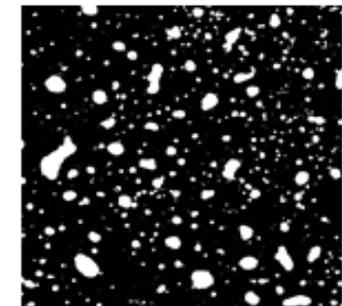
2.2% PVA Surfactant, 10,000rpm



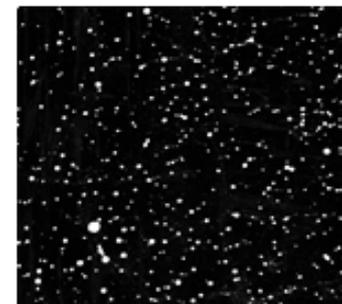
4.4% PVA Surfactant, 10,000rpm



Reference:  
Few randomly distributed air-voids



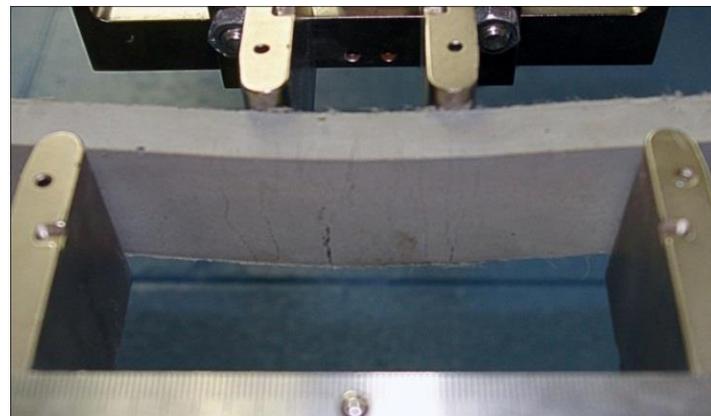
AE:  
Large-size evenly distributed air-voids



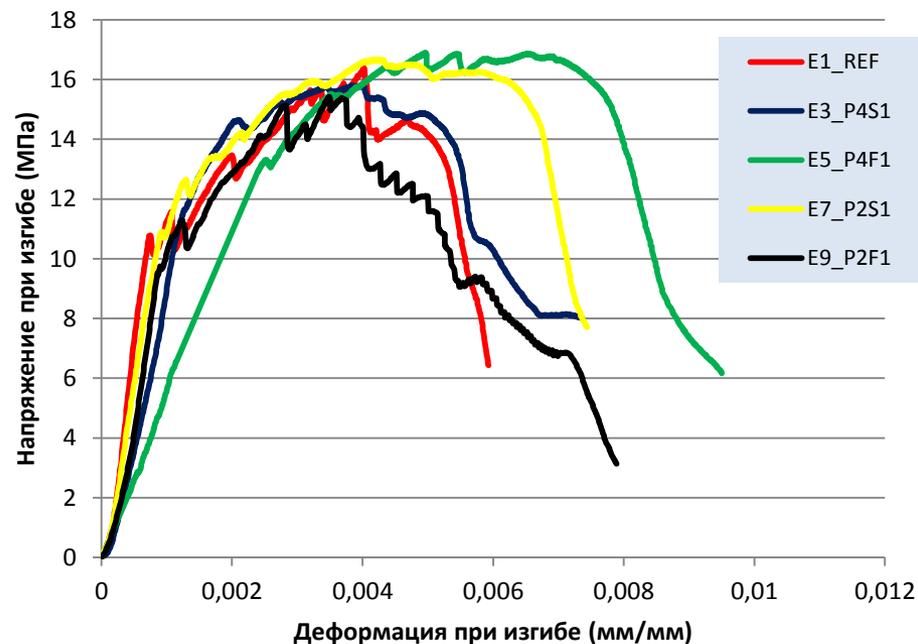
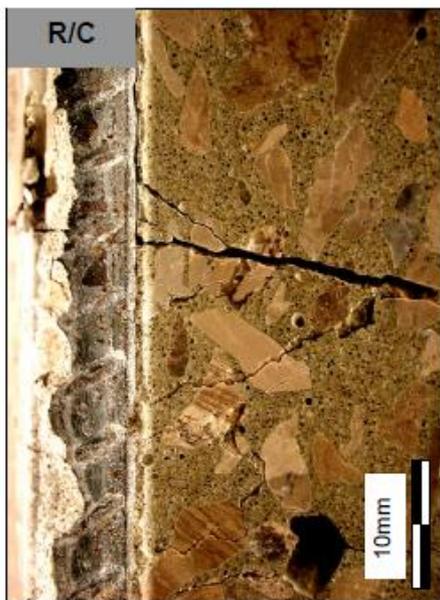
PEHSO:  
Small evenly distributed air-voids

# СГФБ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Сопоставимость деформации между армированным бетоном (слева) и гибким композитом со стальным армированием (справа) после циклической нагрузки:



Гибкий бетон



# МОРОЗОУСТОЙКОСТЬ ОБРАЗЦОВ СГФБ: 400 ЦИКЛОВ: -50 °С



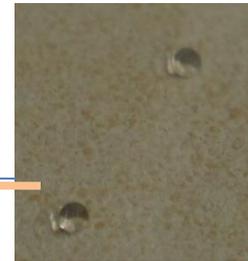
Испытание на морозостойкость в воде

# СГФБ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

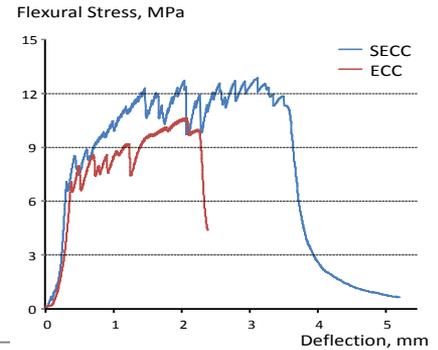
Тестируемые гидрофобизаторы	СУ
• Фенилтриметоксисилан	85
• n-Октилтриетоксисилан	76
• Натрий-метил силиконат	103
• Метилтриметоксисилан	80
• t-Бутилтриметоксисилан	88
• Тетраэтоксисилан	82
• Разработанный состав	118-155
• Разработанный состав + МК	131



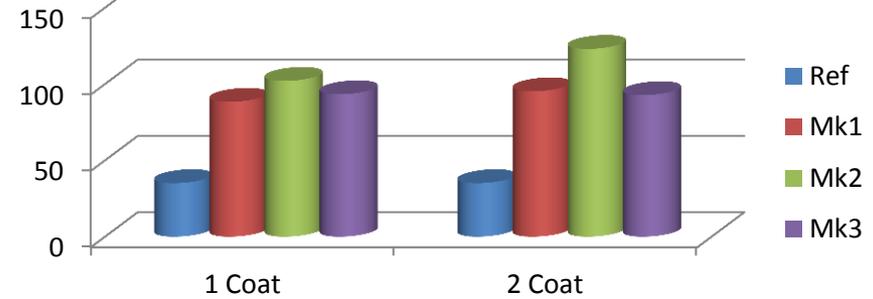
Na Me silicate on ceramic tile:  $\theta = 103^\circ$



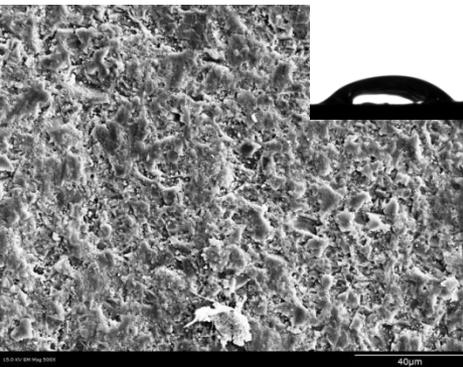
Супергидрофобный фибробетон с повышенными эластическими и деформационно-упрочняющими свойствами:



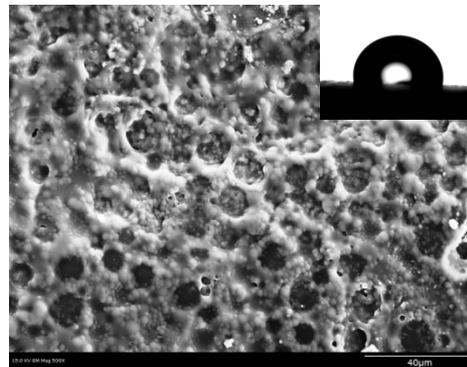
## Contact Angle



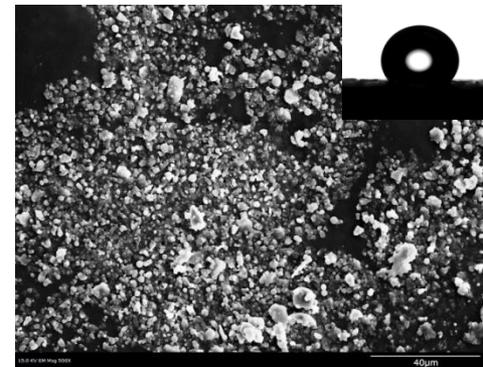
Краевой угол смачивания на поверхности бетонных растворов с одно- и двухслойным супергидрофобным покрытием:



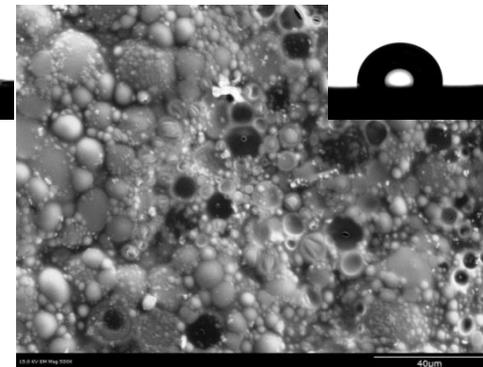
Контрольный состав



Mk1

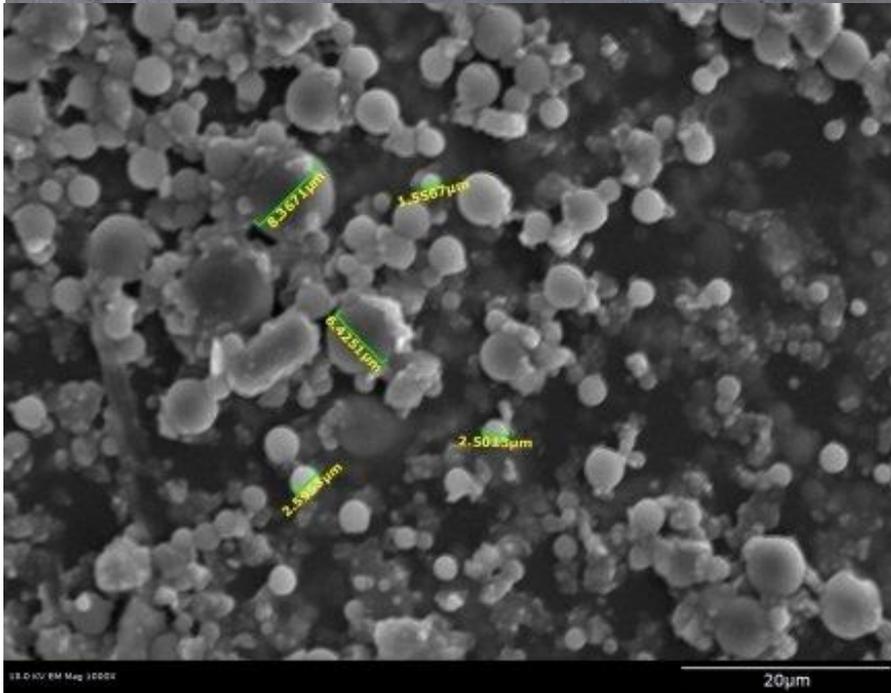


Mk2



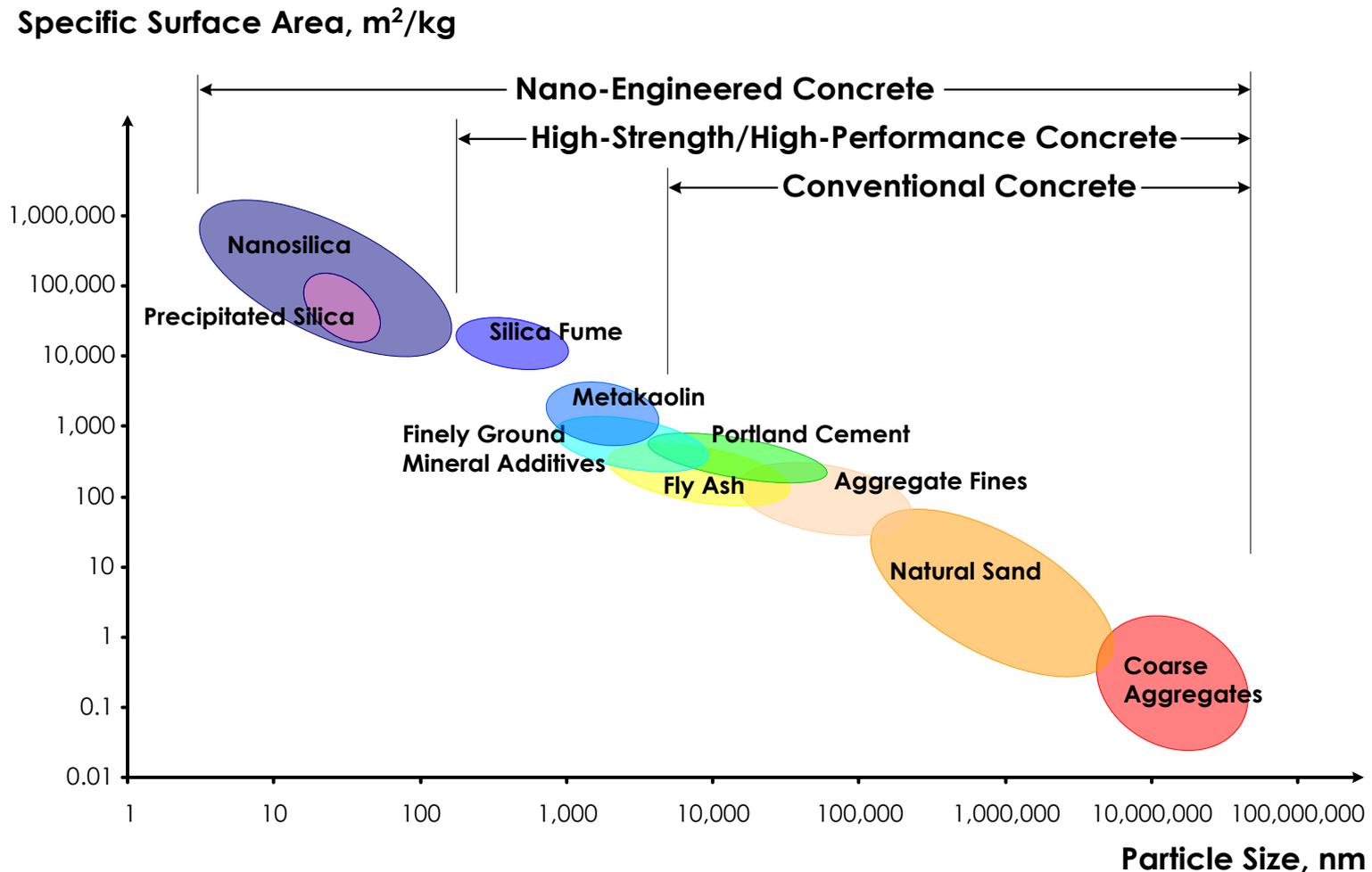
Mk3

# СУПЕРГИДРОФОБНЫЙ БЕТОН



Антиобледенительный бетон??

# РАЗМЕРНАЯ ШКАЛА ЧАСТИЦ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БЕТОНОВЕДЕНИЮ [1]



[1] Sobolev K. and Ferrada-Gutiérrez M., *How Nanotechnology Can Change the Concrete World: Part 2. American Ceramic Society Bulletin*, No. 11, 2005, pp. 16-19.

# ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ

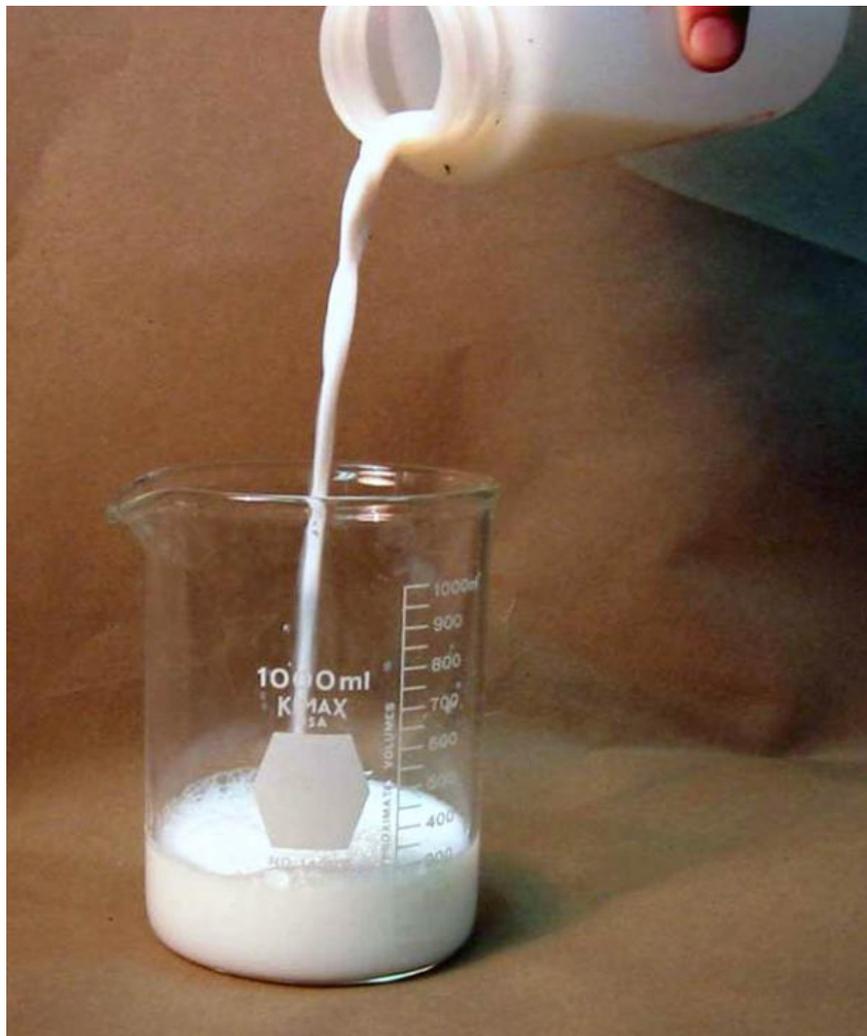
Нано диоксид кремния (или нанокремнезем) может быть применен в качестве добавки в высокопрочном и самоуплотняющемся бетоне, улучшая его удобоукладываемость и прочностные характеристики.

*COURTESY OF DR. ANDRI VITAL,  
EMPA MATERIALS TESTING AND RESEARCH*

0.2  $\mu\text{m}$

**Наночастицы нанокремнезема под ПЭМ**

# ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ



Использование наночастиц в традиционных строительных материалах позволяет улучшить, а также придать им «умные» свойства, необходимые в таких сферах гражданского строительства и инфраструктуры как высотное строительство, создание высокопролетных и «интеллектуальных» конструкций.

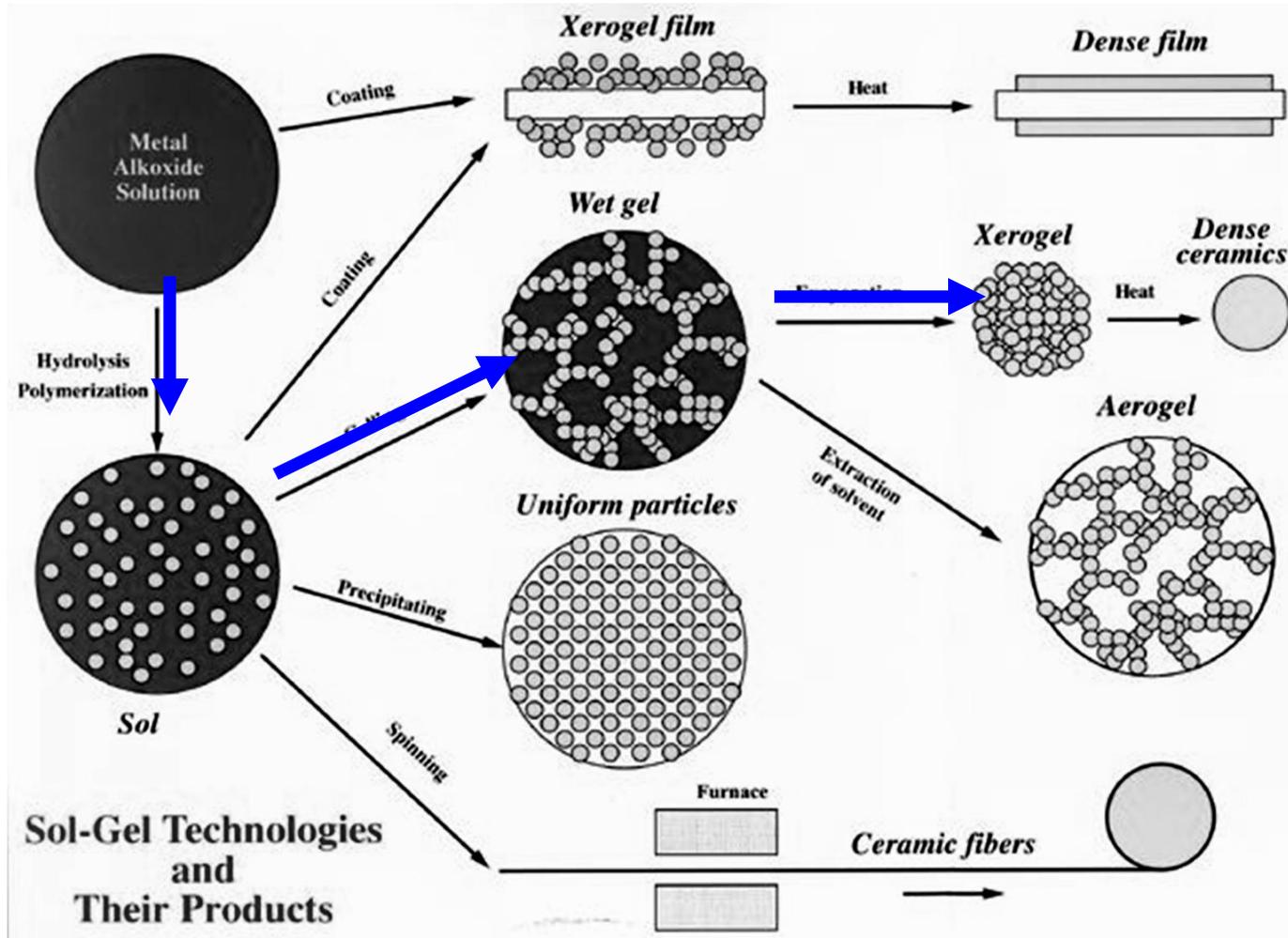
# ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОД

- Синтез нанокремнезема представлен следующей химической реакцией:



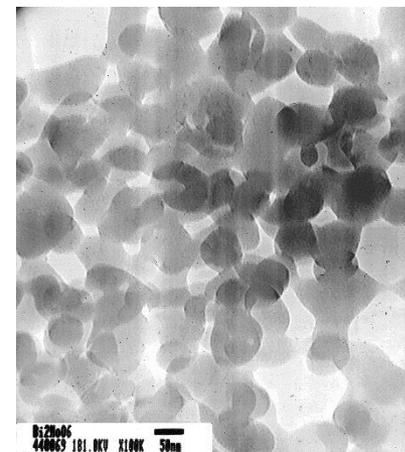
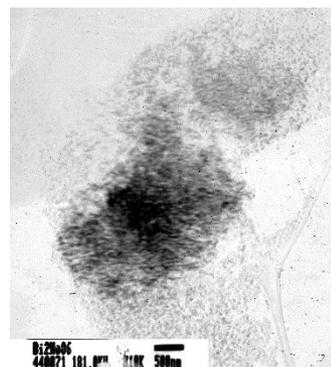
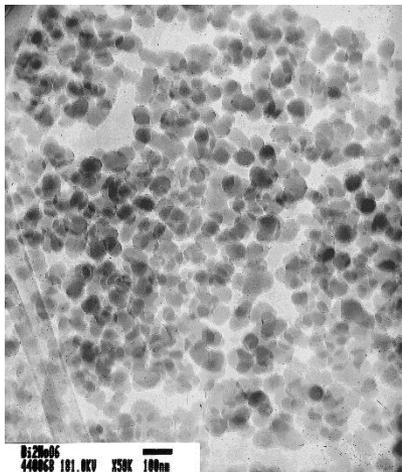
- Такие параметры как pH (должно быть  $> 7$ ), температура, концентрация реагентов,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Si}$  молярное соотношение (между 7 и 25) и тип катализатора оказывают критическое влияние на процесс синтеза.
- В условиях точно подобранных условий синтеза возможно получение сферических наночастиц  $\text{SiO}_2$  идеальной формы в размерном диапазоне 1-100 нм.

# ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗОЛЬ-ГЕЛЯ



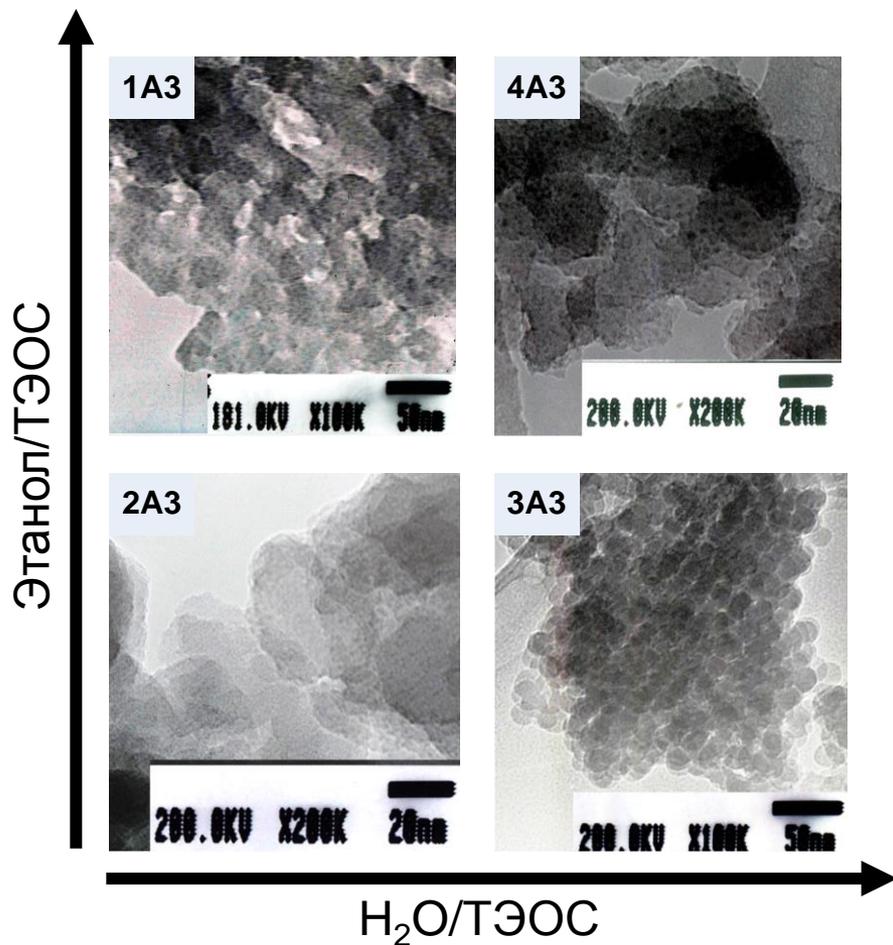
C.J. Binker, G.W. Scherrer; *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*, San Diego; Academic press; 1990.

# НАНОЧАСТИЦЫ ПОД ПЭМ

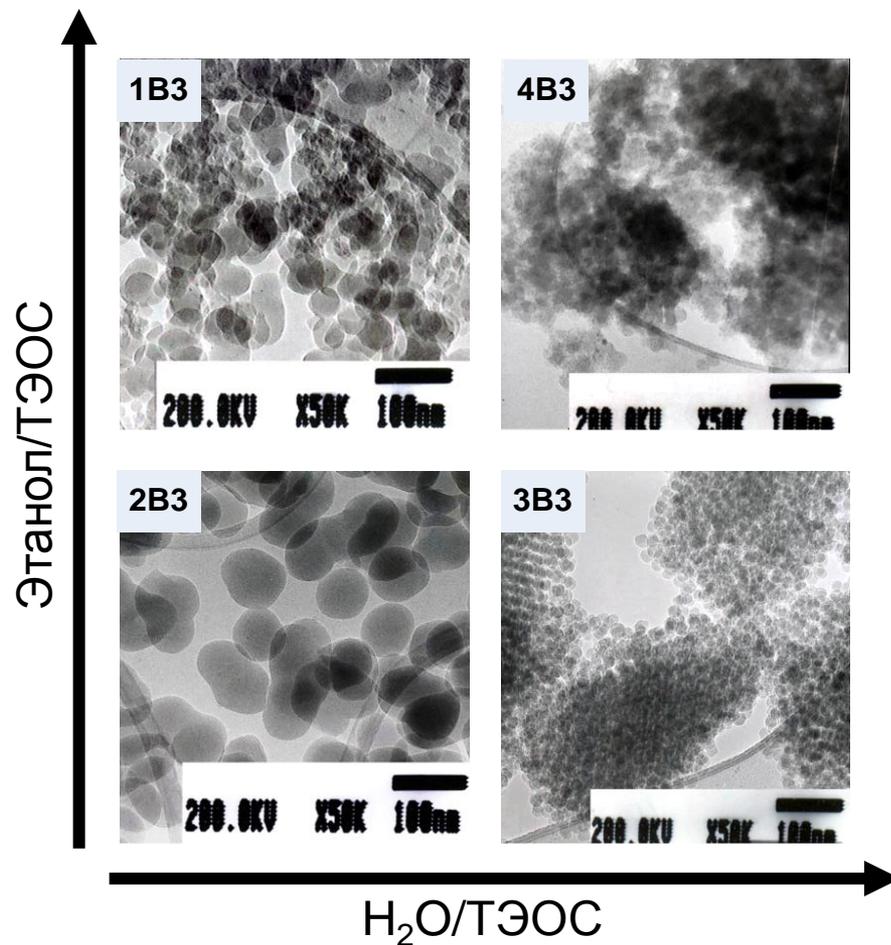


Образец  
нанокремнезема 3В

# ПЭМ ФОТОСНИМКИ НАНО-SiO<sub>2</sub>

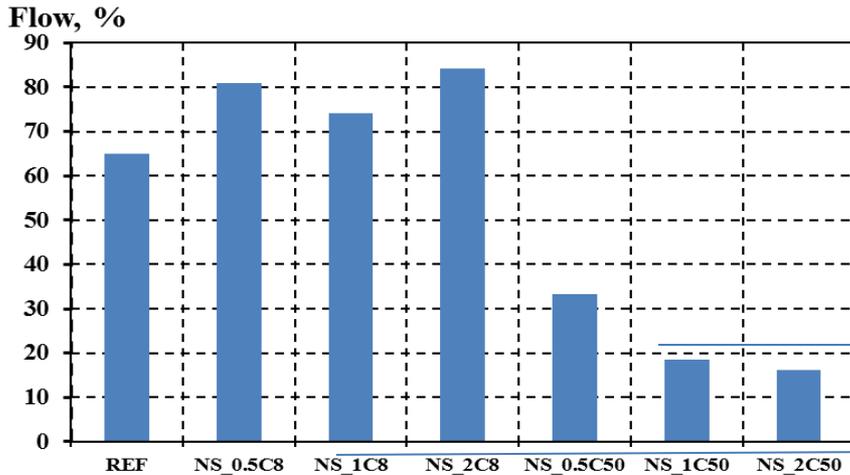


Кислая среда (pH=2) после 3 ч реакции



Щелочная среда (pH=9) после 3 ч реакции

# БЕТОННЫЕ РАСТВОРЫ С НАНОКРЕМНЕЗЕМОМ



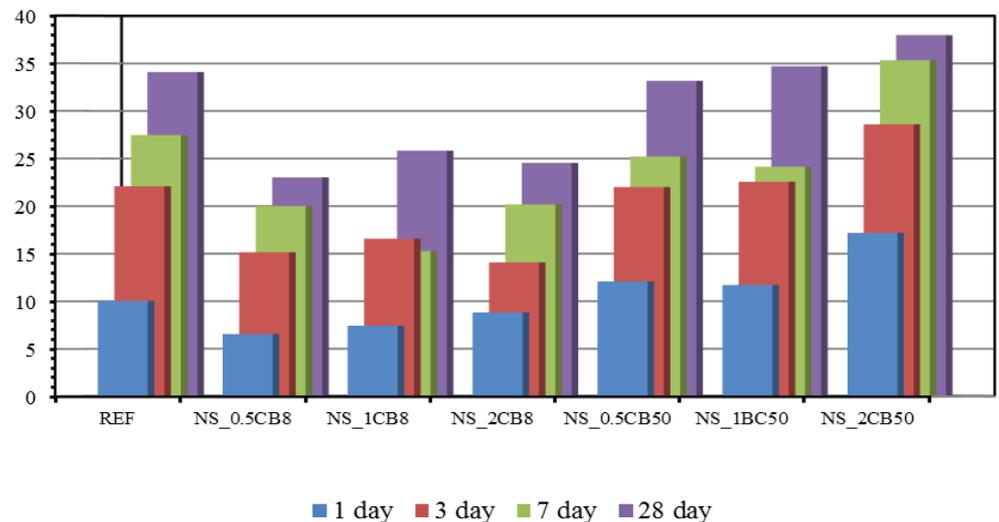
Specific Parameter	Nanosilica Type	
	C50	C8
Density, kg/cm <sup>3</sup>	1.1	1.4
SiO <sub>2</sub> , %	15	50
pH	10.0	9.5
Viscosity, mPa*s	<10	<10
Concentration SiO <sub>2</sub> , %	15	51.5
BET Surface Area, m <sup>2</sup> /g	179.4	61.2
Average particle size, nm	5	10-100

- В/Ц – 0,45, П/Ц - 2,75
- 0,15% суперпластификатора (GUSR, 34%)
- Нанокремнезем - 0,5, 1 и 2%

**РЕЗУЛЬТАТ:** Nano-SiO<sub>2</sub>

- Повышение когезионной прочности
- Ускорение гидратации
- Сокращение сроков схватывания до 4-5 часов
- Увеличение тепловыделения при гидратации
- Повышение прочности на сжатие

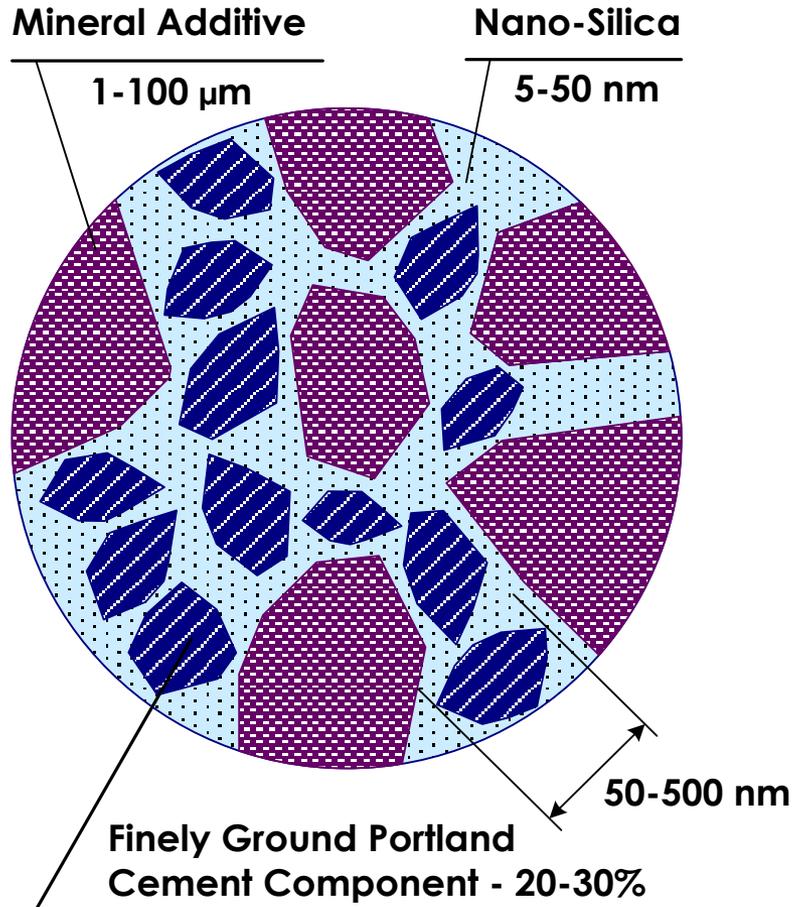
**Compressive Strength, MPa**



# ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

- Высокодиспергированные наночастицы повышают вязкость жидкой фазы, уменьшая сегрегацию и улучшая реологические характеристики системы;
- Наночастицы заполняют пространство между зернами цемента, что приводит к иммобилизации “свободной” воды (эффект “наполнителя”);
- Высокодиспергированные наночастицы выступают в качестве центров кристаллизации новообразований, ускоряя гидратацию и структурообразование цементного камня;
- Наночастицы благоприятствуют образованию мелкокристаллических  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , AFm и однородных кластеров C-S-H;
- Наночастицы кремнезема участвуют в пуццолановых реакциях, реагируя с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием “дополнительного” C-S-H;
- Наночастицы положительно влияют на структуру контактной зоны заполнителей, обеспечивая лучшую адгезию между заполнителями и цементным камнем;
- Наночастицы обеспечивают замедление и блокирующий эффект трещинообразования, что повышает твердость и прочность на изгиб материалов на основе цемента.

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: НАНО-ВЯЖУЩЕЕ



Нано-вяжущее - это вяжущее, содержащее нанодисперсный цементный компонент, служащий в качестве нанозаполнителя между частицами минеральных добавок.

Поэтому, содержание клинкерных минералов составляет только 20-30%.

# ЭФФЕКТ МЕХАНО-АКТИВАЦИИ

Journal

*J. Am. Ceram. Soc.*, 1–9 (2015)  
DOI: 10.1111/jace.13819  
© 2015 The American Ceramic Society

## Nano-Engineered Cements with Enhanced Mechanical Performance

Konstantin Sobolev,<sup>‡,§,¶,†</sup> Zhibin Lin,<sup>||</sup> Ismael Flores-Vivian,<sup>‡</sup> and Rani Pradoto<sup>‡</sup>

<sup>‡</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin

<sup>§</sup>Concrete Sustainability Hub, MIT, Cambridge, Massachusetts

<sup>¶</sup>Institut für Baustoffe, TU Dresden, Dresden, Germany

<sup>||</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, North Dakota State University, Fargo, North Dakota

### М-Х активация цемента:

- Активация производилась мокрым помолом в вибромельнице
- Помол осуществлялся в течение 15, 30 и 60 минут

### Растворы:

- 10-30% активированного цемента (ASTM Тип I, Lafarge) с размером частиц от 2.5 до 35  $\mu\text{m}$
- 0.3-0.9% Megapol 40 DF PAE/SP, концентрации 38.7%, Handy Chemicals
- До 0.25% Сембinder-8, СВ8, 51.5%, Ека Chemicals)
- 0.06% Трибутил-фосфата, ТВР/99%, Aldrich
- Фракционированный песок Ottawa (ASTM C778).
- Дистиллированная вода

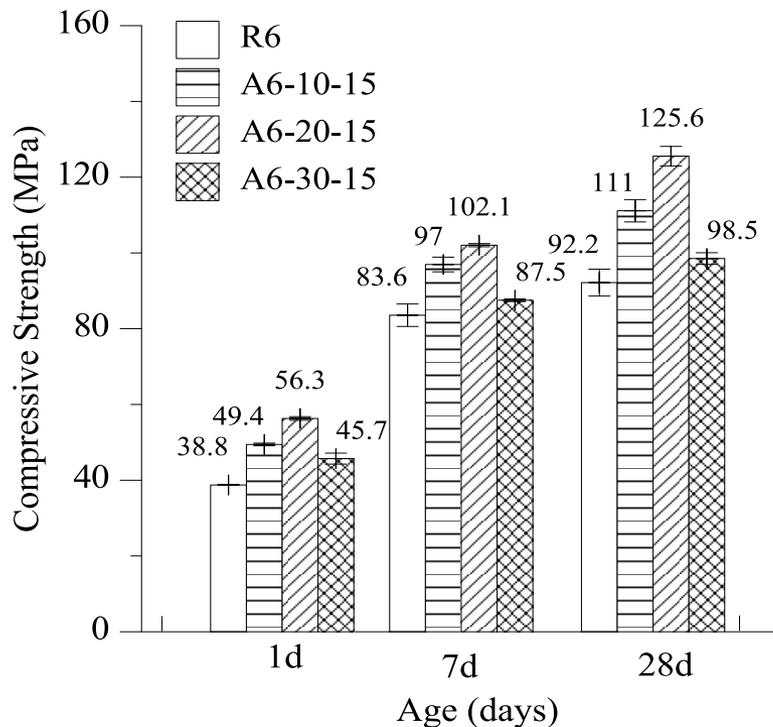
Название образца	СП+ ТБФ, %	Активированное ЦТ		Осадка/Распływ конуса, мм
		Замещение цемента, %	Время активации, min	
R3	0.3	-	-	18
R6	0.6	-	-	73
R9	0.9	-	-	>140
A6-10-15	0.6	10	15	>140
A6-10-30	0.6	10	30	>140
A6-10-60	0.6	10	60	>140
A6-20-15	0.6	20	15	>140
A6-20-30	0.6	20	30	>140
A6-20-60	0.6	20	60	>140
A6-30-15	0.6	30	15	>140
A6-30-30	0.6	30	30	>140
A6-30-60	0.6	30	60	>140
A3-20-15	0.3	20	15	18
A3-20-30	0.3	20	30	8
A3-20-60	0.3	20	60	15
A9-20-15	0.9	20	15	>140
A9-20-30	0.9	20	30	>140
A9-20-60	0.9	20	60	>140

Source : K. Sobolev, Z. Lin, I. Flores-Vivian, R. Pradoto, "Nano-Engineered Cement with Enhance Mechanical Performance" in *Journal American Ceramics Society*, 1-9 (2015)

# ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА МЕХАНО-АКТИВАЦИИ

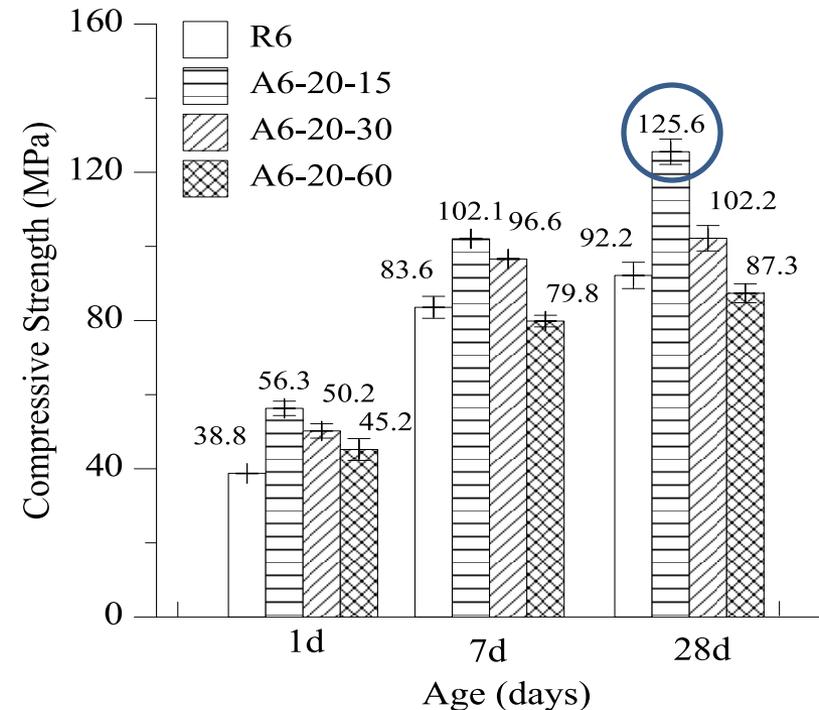
## Механические свойства

- Увеличение прочностных показателей на всех сроках твердения в сравнении с контрольным раствором
- Различная дозировка ЦТ, активированного в течение 15 минут



## Механические свойства

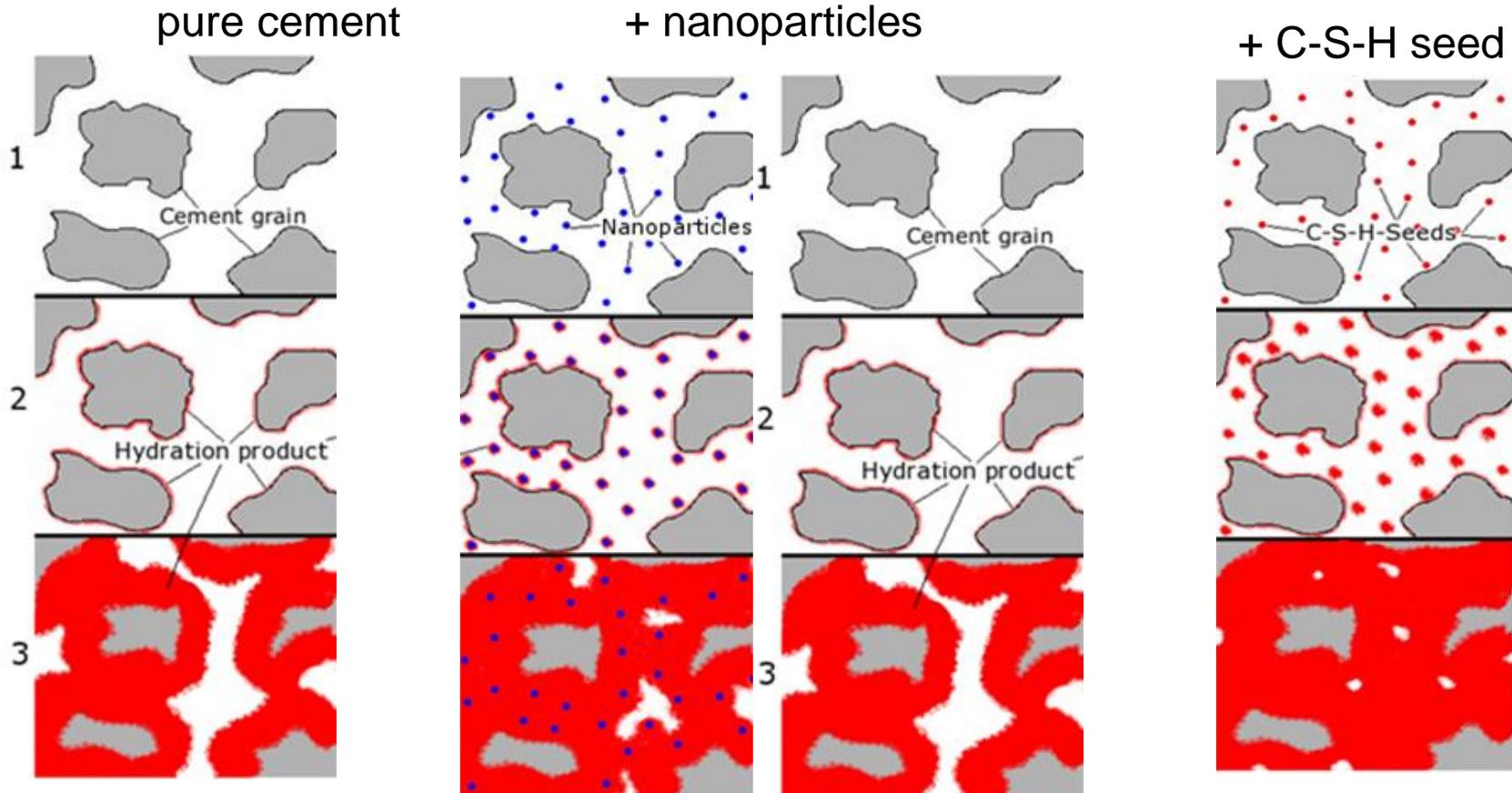
- 20% активированного цемента
- Увеличение прочности а сжатие до 125.6 МПа в сравнении с 56.3 МПа



**Введение 20% активированного цемента значительно повышает прочность на сжатие!**

Source : K. Sobolev, Z. Lin, I. Flores-Vivian, R. Pradoto, "Nano-Engineered Cement with Enhance Mechanical Performance" in Journal American Ceramics Society, 1-9 (2015)

# ЦЕНТРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ



## ЗАДАЧИ:

- Замещение цемента такими индустриальными отходами, как зола-уноса подразумевает уменьшение ранней прочности;
- Разработка СУБов, при одновременном решении проблемы расслоения и низкой кинетики набора прочности;
- Введение наночастиц позволят повысить раннюю прочность и устранить проблемы расслоения; однако, последствия в виде нежелательных реологических свойств системы и аггломерация наночастиц ввиду высокой удельной поверхности требуют дальнейшего изучения и устранения;
- Эффективное применение наночастиц подразумевает их низкозатратное производство.

## РЕШЕНИЕ:

Аппробация подхода «сверху-вниз», подразумевающего совместный мокрый помол золы-уноса и наночастиц с добавлением суперпластификатора.

# ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

..... разработка вяжущих с использованием механо-химической активации (МХА) золы-уноса в комбинации с наночастицами и суперпластификатором позволяет значительно увеличить свойства строительных материалов на основе смешанных цементов

# СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ:

- Осадка/расплыв конуса
- Объем вовлеченного воздуха
- Плотность свежеприготовленной бетонной смеси



V-funnel test



Расплыв конуса

# СВОЙСТВА ЗАТВЕРДЕВШЕГО БЕТОНА:

- Прочность на сжатие



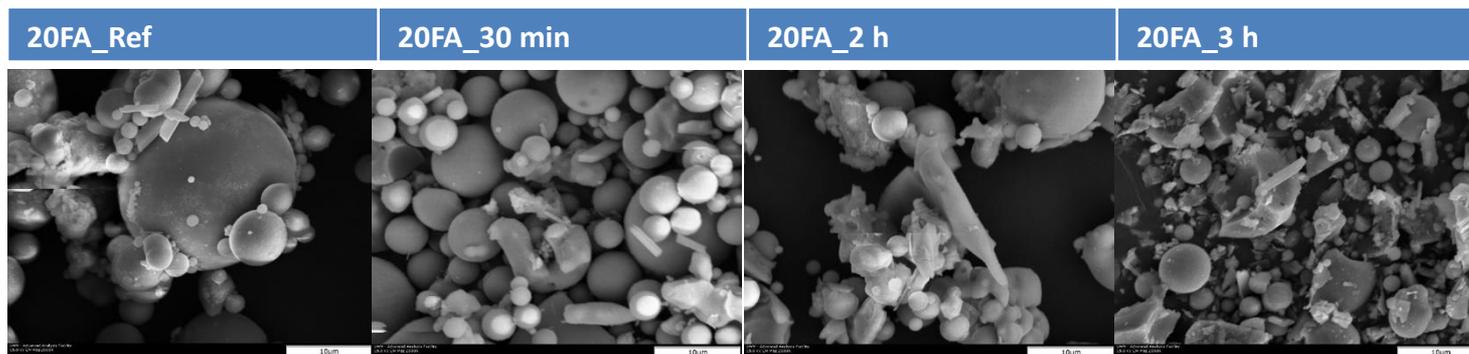
J-Ring test

# МЕХАНО-ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ

Mix ID	Cement Replacement with Fly Ash, %	Activation Time, hours	W/CM	Composition of Activated Component, %				Flow,%	Setting time, minutes	
				Fly Ash		SP	Nano silica		Initial	Final
				Class F	Class C					
R1	30	-	0.36	20	-	0.15	-	82	210	450
30AFAF-1	30	1	0.36	20	-	0.15	-	83	210	435
30AFAF-2	30	2	0.36	20	-	0.15	-	94	180	372
30AFAF-3	30	3	0.36	20	-	0.15	-	108	165	332
30AFAF-4	30	4	0.36	20	-	0.15	-	>140	150	306
R2	-	-	0.3	-	-	0.15	-	47	84	420
20FAC-R	20	3	0.3	-	20	0.15	-	42	228	582
20AFAC-3	20	3	0.3	-	20	0.15	-	105	54	240
20AFAC-NS-3	20	3	0.3	-	20	0.15	0.1	90	60	258
20FAF-R	20	3	0.3	20	-	0.15	-	>140	108	324
20AFAF-3	20	3	0.3	20	-	0.15	-	>140	108	300
20AFAF-NS-3	20	3	0.3	20	-	0.15	0.1	130	108	348

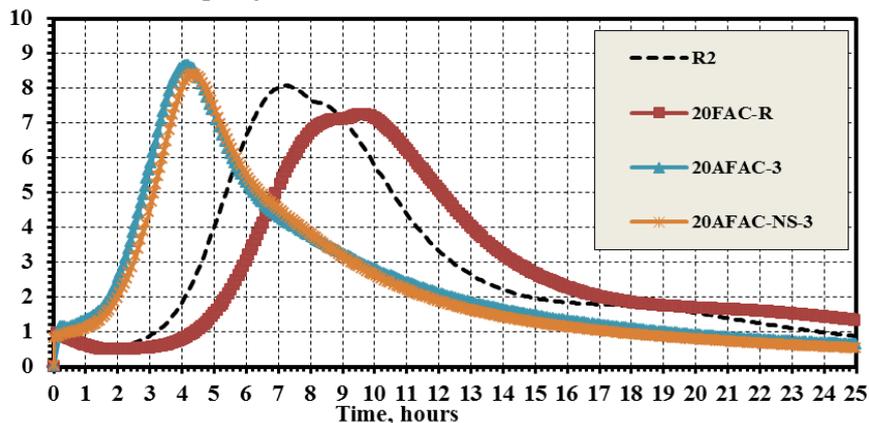
## МИКРОСТРУКТУРА АКТИВИРОВАННОЙ ЗОЛЫ-УНОСА

Фотоснимки золы-уноса с разрешением x2000

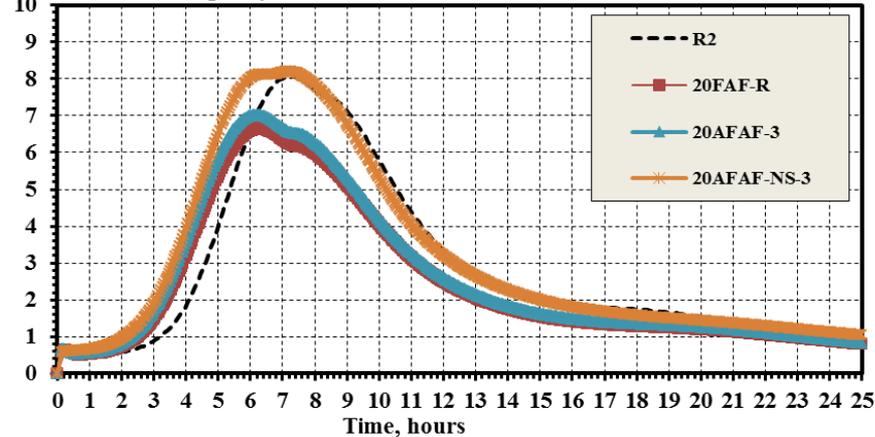


# МЕХАНО-ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ

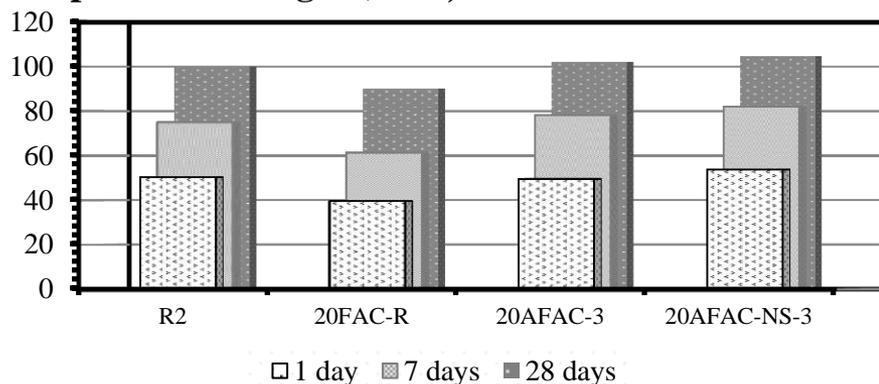
Heat Flow, mW/g Dry Binder



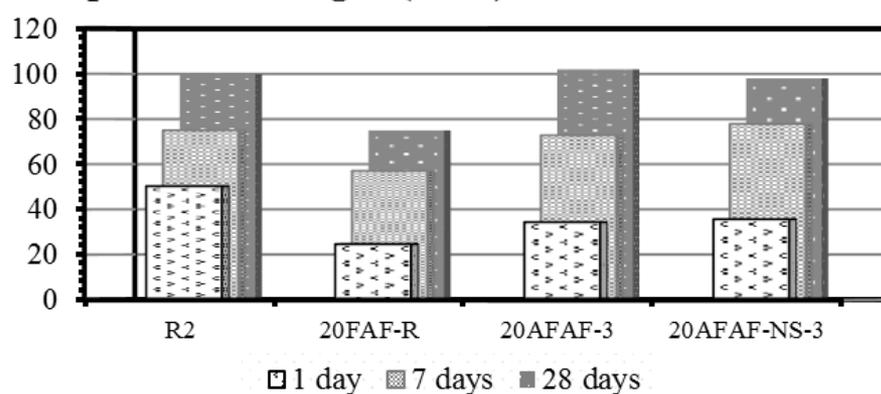
Heat Flow, mW/g Dry Binder



Compressive Strength (MPa)



Compressive Strength (MPa)



# РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ СУБ

Cementitious material content of 400 and 500 kg/m<sup>3</sup>

Cement Factor	Mix ID		Dosage of Admixture, %		Mixture Proportions, kg/m <sup>3</sup>									
			PCE	Nano silica	Cement	SCM Fly Ash C	AC	Aggregate (SSD)				Admixtures		Total Water
								CA	IA	FA	Total	PCE	Nano silica	
400 kg/m <sup>3</sup>	SCC1	0.15NS_0.15 SP	0.15	0.15	400	0	0	764	188	898	1850	0.938	3.427	181
	SCC3	30FAC_0.15NS_0.15 SP	0.15	0.15	400	30	0	759	187	891	1837	0.938	3.427	181
	SCC9	50FAC_0.15NS_0.15 SP	0.15	0.15	400	50	0	755	186	887	1828	0.938	3.427	181
	SCC7	30ACFAC_0.15NS_0.2 SP	0.20	0.15	400	0	30	758	186	891	1835	1.251	3.427	181
	SCC5	30ACFAC_0.15NS_0.25 SP	0.25	0.15	400	0	30	758	186	890	1834	1.564	3.427	181
500 kg/m <sup>3</sup>	SCC4	0.15NS_0.2 SP	0.2	0.15	500	0	0	733	180	861	1775	1.564	4.284	179
	SCC8	30FAC_0.15NS_0.2 SP	0.2	0.15	500	30	0	711	175	835	1722	1.564	4.284	179
	SCC11	50FAC_0.15NS_0.15 SP	0.15	0.15	500	50	0	711	175	835	1722	1.173	4.284	179
	SCC6	30ACFAC_0.15NS_0.2 SP	0.2	0.15	500	0	30	727	179	853	1759	1.564	4.284	179
	SCC10	30ACFAC_0.15NS_0.25 SP	0.25	0.15	500	0	30	727	179	853	1759	1.955	4.284	178

## Свойства смесей:

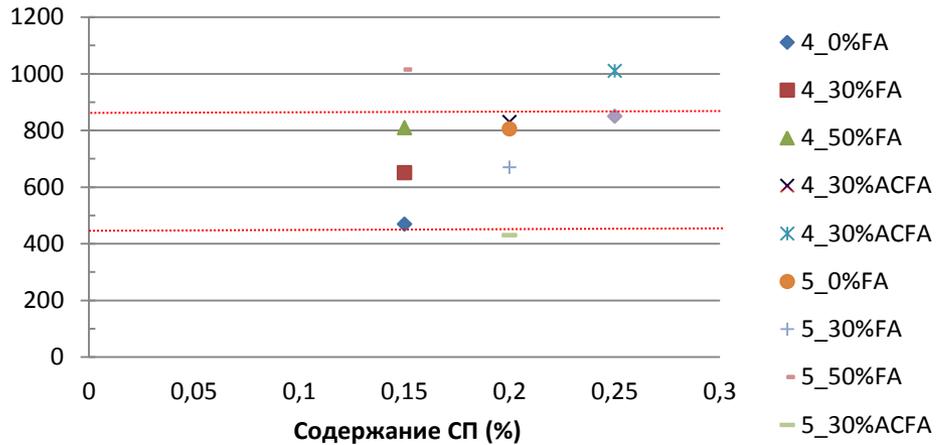
- “V-funnel” тест
- Осадка/распływ конуса
- “J-Ring” тест

## Свойства затвердевшего бетона:

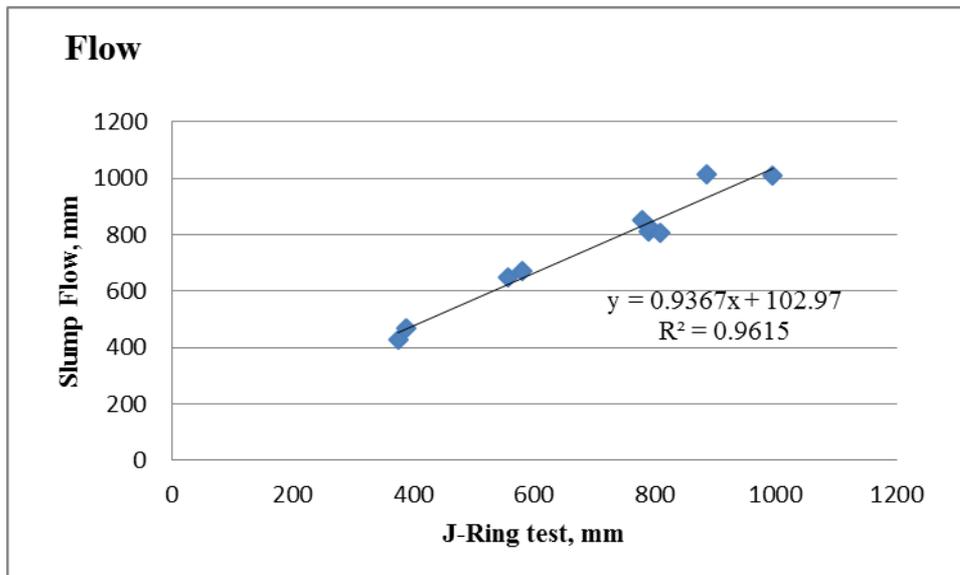
- Прочность на сжатие

# РАСПЛЫВ КОНУСА

## Распływ конуса

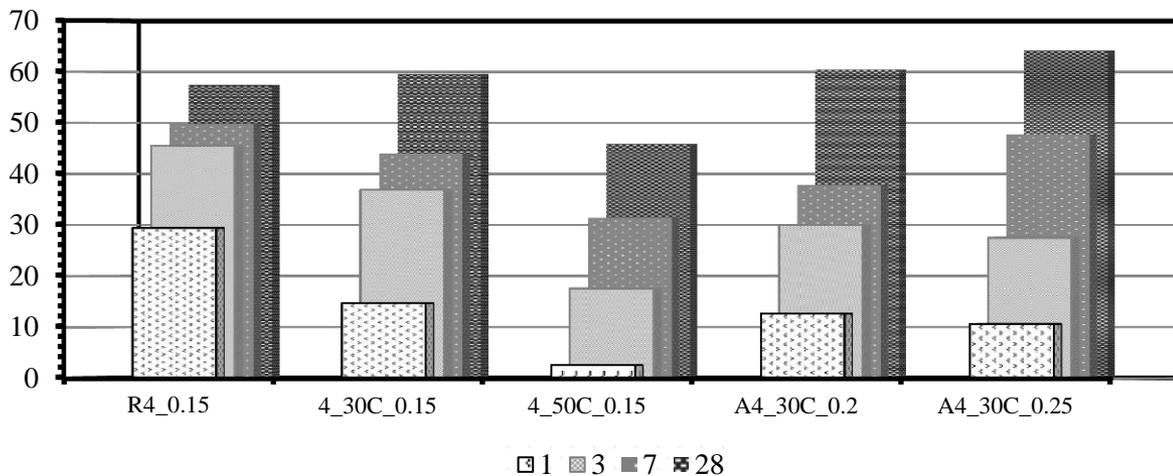


- Согласно ASTM C1611 распływ конуса для СУБов составляет 450- 810 мм.
- Наблюдается хорошая корреляция между распльвом конуса и показателями “J-Ring” теста.

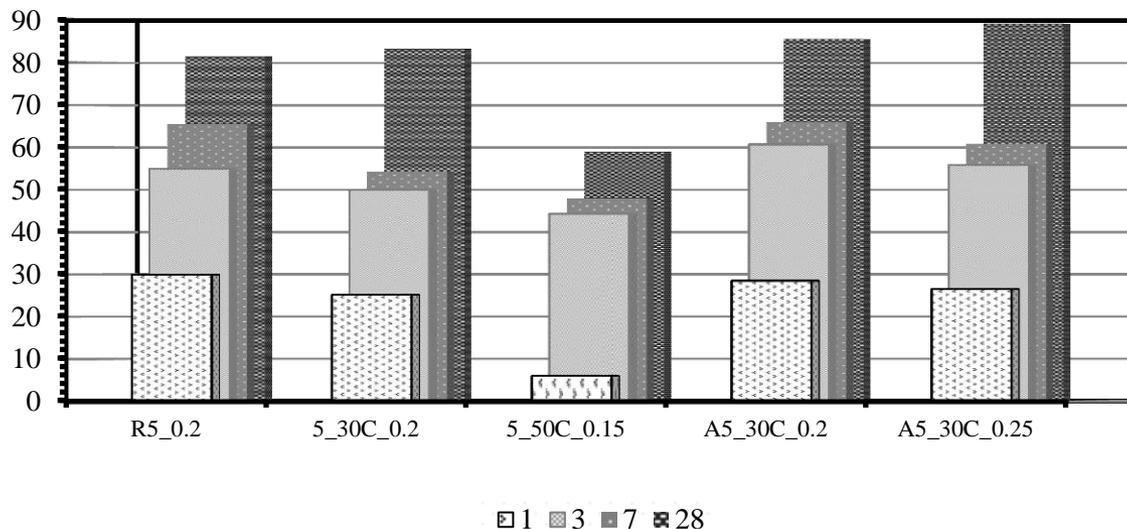


# ПРОЧНОСТЬ НА СЖАТИЕ

Прочность на сжатие (МПа)



Прочность на сжатие (МПа)



Максимальная прочность на сжатие в 28-суточном возрасте 64 МПа и 89 МПа была достигнута для СУБов на основе активированной золы-уноса, с содержанием СП 0,25% и вяжущего в количестве 400 кг/м<sup>3</sup> и 500 кг/м<sup>3</sup>.

# ВЫВОДЫ

Наноструктура бетона может быть исследована и визуализирована помощью современного «наноскоп-» инструментария.

Супергидрофобная гибридизация подразумевает использование междисциплинарных знаний и подходов включающих биомиметику (эффект Лотоса), химию (кремнийорганические соединения) и нанотехнологии (частицы нанокремнезема) с целью решения фундаментальных задач бетоноведения, таких как недостаточная долговечность и коррозионная стойкость.

Нанокремнезем – многофункциональный наноматериал, способный улучшить характеристики бетона. Введение нанокремнезема до 1% ускоряет гидратацию и повышает прочность на сжатие за счет зародышеобразования и последующего формирования C-S-H и уплотнения микроструктуры. Теплота гидратации и прочность цементных паст и растворов могут быть применимы в качестве оптимизирующих параметров и разработки наномодифицированных композитов.

Применение оптимальных композиций «зола-унос - нанокремнезем-СП» может повысить удобоукладываемость портландцементных систем.

# ВЫВОДЫ

Использование оптимальной комбинации РСЕ добавки (0,2%) и нанокремнезема (0,5%) в цементных системах позволяет снизить В/Цм и, в тоже время, повысить удобоукладываемость, раннюю прочность (+40% на 3-и сутки) и обеспечить 28-суток прочность на сжатие до 100 МПа.

Механо-химическая активация - это довольно успешный метод введения наноматериалов и систем на основе зол-уноса, позволяющий повысить физико-механические характеристики на ранний и поздних сроках твердения цементных систем. Зола-уноса класса С в сравнении с классом F демонстрирует лучшие показатели как до, так и после активации.

Разработанные СУБы на основе nano-инженерных композитов могут включать до 30% активированной золы-уноса в комбинации с СП до 0,25% и до 1% нанокремнезема.

Наилучшие показатели прочности на сжатие на 28-суток составили 64 МПа и 89 МПа для СУБов на основе активированной золы-уноса при содержании вяжущего 400 кг/м<sup>3</sup> и 500 кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

# ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Более глубокое изучение эффектов золы-уноса класса F на свойства бетона, а также разработка новых методов активации зол-уноса.

Определить влияние активированной золы-уноса композиционный состав и морфологию затвердевших цементных матриц после 28-суточного твердения.

Изучение долговечности разработанных СУБов на основе активированной золы-уноса.

# ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

- PCA
- We Energies
- Wis DOT
- Wis RMCA
- EPRI
- ERDC- Army Corps of Engineers
- NSF
- UWM RGI
- UWM Foundation
- Lafarge
- Handy Chemicals

# ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

- Ismael Flores-Vivian
- Rani Pradoto
- Marina Kozhukova
- Reza Moini
- Scott Muzenski
- Emil Bautista
- Clayton Cloutier
- Justin Flickinger
- Kali Lorraine Phillips
- Andrew Sinko
- Emily Ann Szamocki
- Nathaniel Havener
- Leif Stevens  
Jackson
- Brian Mullen
- Brian Mitchell
- Katie LeDoux
- Sara Dashti
- Gaven Kobes
- Jason Atchinson
- Chris Ball
- Brandon Bosch
- Rahim Reshadi
- Brent Kriha
- Mark Moyle
- Jesus Cortes
- Sunil Rao
- Jayeesh Bakashi

# Вопросы?

