

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА «СТРОИТЕЛЬСТВО УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

Ю.Г.Барабанщиков

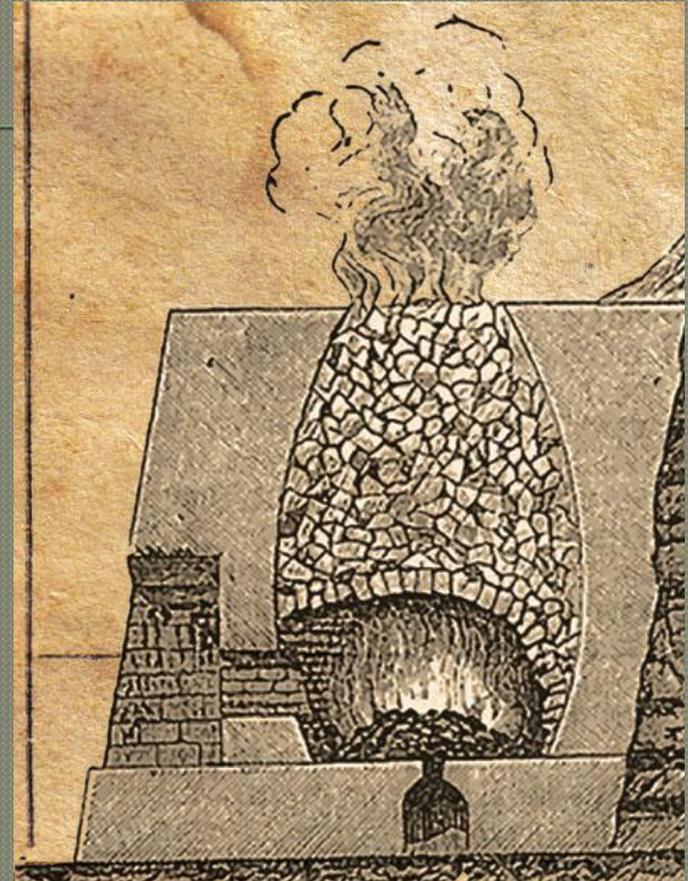
Лекция 16. Портландцемент

Строительные материалы

*Слайды видеолекций
для бакалавров по направлению строительство*

2017

Воздушная известь



Известь была известна очень давно в Греции или еще раньше на Крите. Римляне заимствовали ее у греков.

Пуццолана



Греки и римляне знали, что некоторые вулканические породы будучи измельчены и добавлены к извести придают ей гидравлические свойства. Наилучшей разновидностью таких материалов считался туф из местечка Поццуоли (по-латински Потеоли)

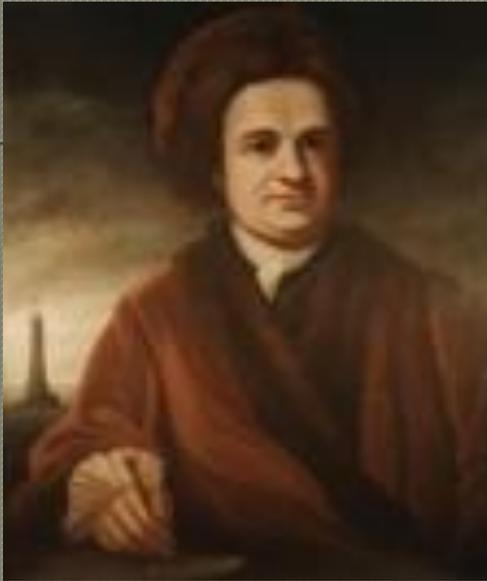
Древнеримский бетон 2000-летней давности



Группа исследователей изучила состав античного бетонного волнолома, который находился в бухте Путтеолы в Средиземном море.

На иллюстрации желтоватые включения - пемза, черные - лава, основной фон - кристаллические материалы, белые - известь.

Гидравлическая известь



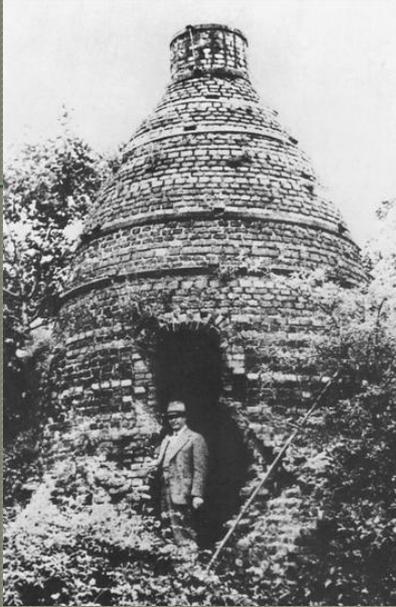
Джон Смитон (John Smeaton) (1724—92), англ. инженер по гражд. строительству

Д. Смитон искал наилучшее сырье для получения извести. Из известкового раствора он лепил шары жесткой консистенции и опускал их в воду немедленно после схватывания. Оказалось, что те из них, которые содержат значительное количество глинистых примесей, дают известь более высокого качества. В 1756 г. Д. Смитону был выдан патент на гидравлическую известь



Маяк на скалах Эддистона, построенный в 1698 г., был уничтожен бурей в 1703 г. Второй маяк, деревянный, сгорел в 1755 г. В 1756 г. третий вариант маяка, уже из камня, построил Джон Смитон. 120 лет спустя маяк разобрали. Отстроенный заново маяк можно видеть на фото

Романцемент



1796 году Джеймс Паркер, британский священник и производитель цемента, получил патент под названием «Некий Цемент или Террас, который будет использоваться в гидротехнических и других конструкциях и лепнине»

Он создал свой завод в Нортфлите, графство Кент.

Но продал свой патент Самуэлю Уайатту, кто со своим двоюродным братом Чарльзом производит цемент под именем Паркер & Уайатт. Сам Паркер эмигрировал в Америку в 1797 году, и вскоре умер. Романцемент Уайатта был использован в строительстве знаменитого маяка Bell Rock. Цемент производился из мела и глины с острова Sheppey. Начиная примерно с 1807 многие пытались получить собственные версии этого цемента. Среди них были Джеймс Фрост, кто имел около двадцати патентов, и Джозеф Аспдин – изобретатель Портландцемента.



Портландцемент

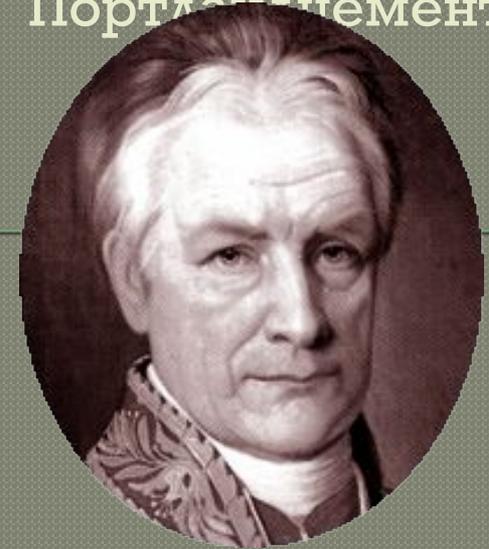


Прибор Вика

Открытие Паркера вызвало множество исследований, среди которых особенно известны труды французского инженера Луи Вика, выяснившего причины гидравличности глинистых известняков. В 1817 он получил портландцемент, но не стал подавать заявку на патент

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

Луи Вика (1786-1861)



L'AN 1812
A ETE COMMENCEE LA CONSTRUCTION
DE CE PONT SOUS LA DIRECTION
DE
LOUIS VICAT
INGENIEUR DES PONTS & CHAUSSEES
QUI A LE PREMIER ETABLI LA THEORIE
ET MIS AU POINT LA FABRICATION DES
CHAUX HYDRAULIQUES ARTIFICIELLES

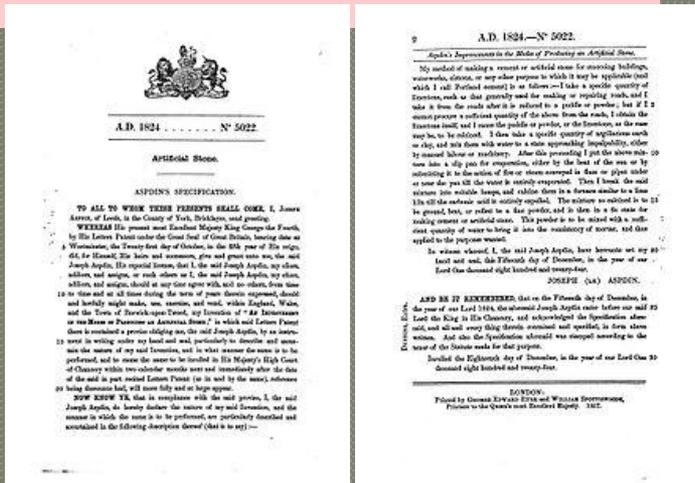


Pont de Louis Vicat à Souillac

Портландцемент

Компания Паркер и Уайатт вышла из бизнеса в 1846 году, и завод Нортфлит был продан компании Уильяма Аспдина.

Джозеф Аспдин (1778 - 1855) старший из шести детей Томаса Аспдина, каменщик из Лидса, графство Йоркшир, считается изобретателем портландцемента. К 1817 он создал самостоятельный бизнес в центре Лидса. Он, должно быть, экспериментировал с производством цемента в течение следующих нескольких лет, потому что 21 октября 1824 им был получен британский патент ВР 5022 под названием «Улучшение способа производства искусственного камня», в котором он ввел термин "Портландцемент" по аналогии с камнем Портленде, оолитового известняка, который добывается на острове Портленд в Дорсете



Портландцемент

Получение, процессы при твердении, свойства, применение



Портландцемент (ПЦ) есть гидравлическое вяжущее вещество — продукт тонкого измельчения клинкера, получаемого обжигом до спекания сырьевой смеси, состоящей чаще всего из

известняка (75-78 %), содержащего CaCO_3 , и **глины** (25-22 %), дающей при разложении нужное количество кислотных окислов:



Эти окислы должны связать всю свободную известь CaO , образующуюся при разложении CaCO_3 , в труднорастворимые соединения:



Подготовка сырьевой шихты (добыча, дробление, помол, гомогенизация)

Известняк
(мел)

Глина
(глинистый сланец)

Корректирующие добавки
(кварц, боксит, огарки, каолин)

Обжиг

Природный
гипс

Клинкер

Активные минеральные
добавки

(вулканические пеплы, туфы,
трассы, диатомит, трепел,
опока, глиежи, шлаки, зола-
унос, микрокремнезем,
метакаолин)

Помол

Помол

Портландцемент

Портландцемент с мин. добавками
Пуццолановый портландцемент
Шлакопортландцемент

Получение портландцемента

Добыча известняка



Получение портландцемента

Добыча глины



Получение портландцемента

Приготовление сырьевой смеси

Сырьевая мука

Сухой способ

Достоинства:

1. Пониженный расход топлива при обжиге

Недостатки:

1. Необходимость сушки
2. Повышенные затраты на помол
3. Наличие пыли

Шлам

Мокрый способ

Достоинства:

1. Отсутствие сушки
2. Облегченный мокрый помол
3. Снижение затрат на помол
4. Отсутствие пыли

Недостатки:

1. Повышенный расход топлива при обжиге
2. Неприменим при добавке доменного гран. шлака

Шлам-бассейн



Химический состав сырья

Окислы	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Проч.
Содержание, %	63-66	21-24	4-8	2-4	0,5-5	0,3-1	0,7-1,8

Важнейшие окислы

CaO – окись кальция

SiO₂ – кремнезем

Al₂O₃ – глинозем

Fe₂O₃ – окись железа

Нежелательные

MgO ≤ 5 %;

SO₃ = 1,5-3,5 %

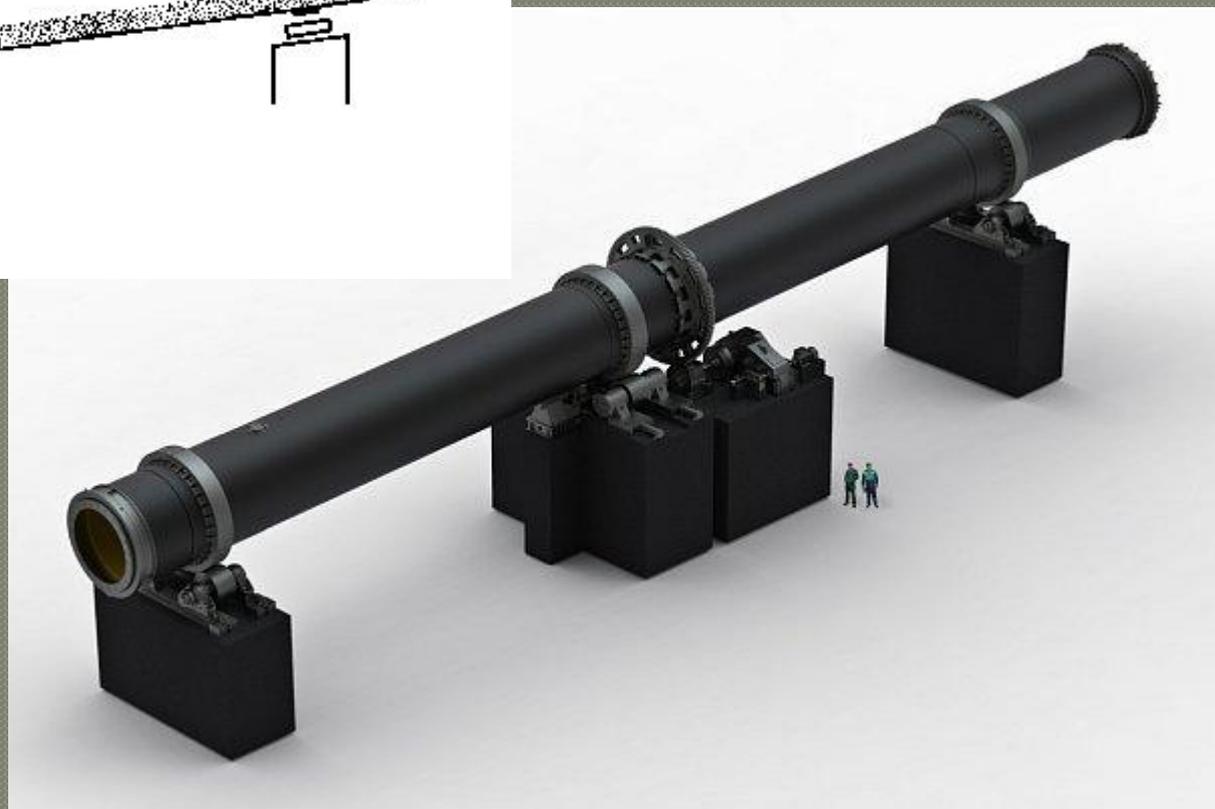
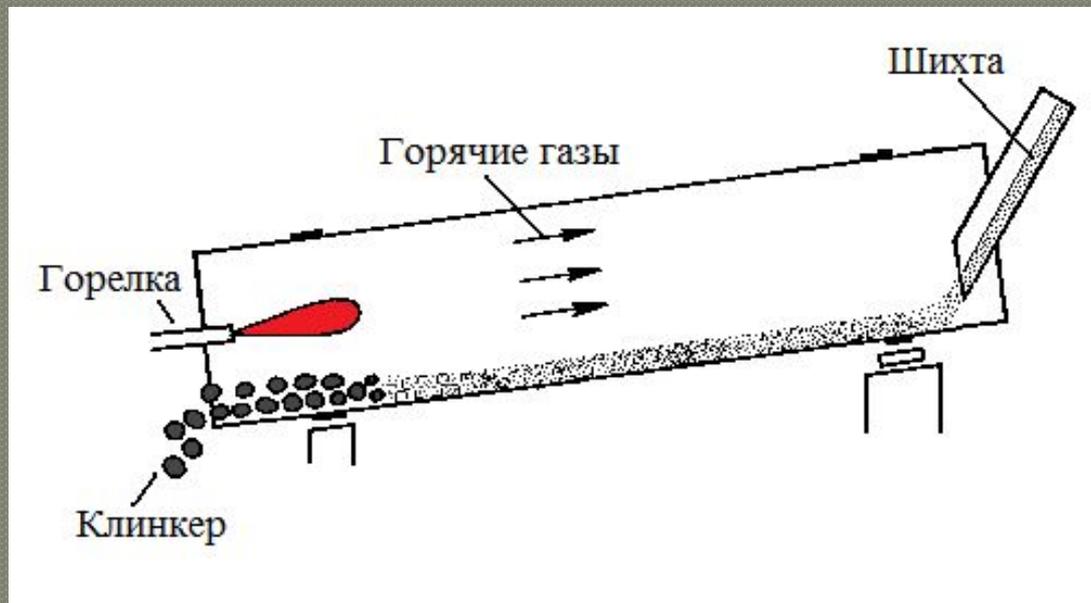
(Na₂O + K₂O) ≤ 0,6 %

Обжиг

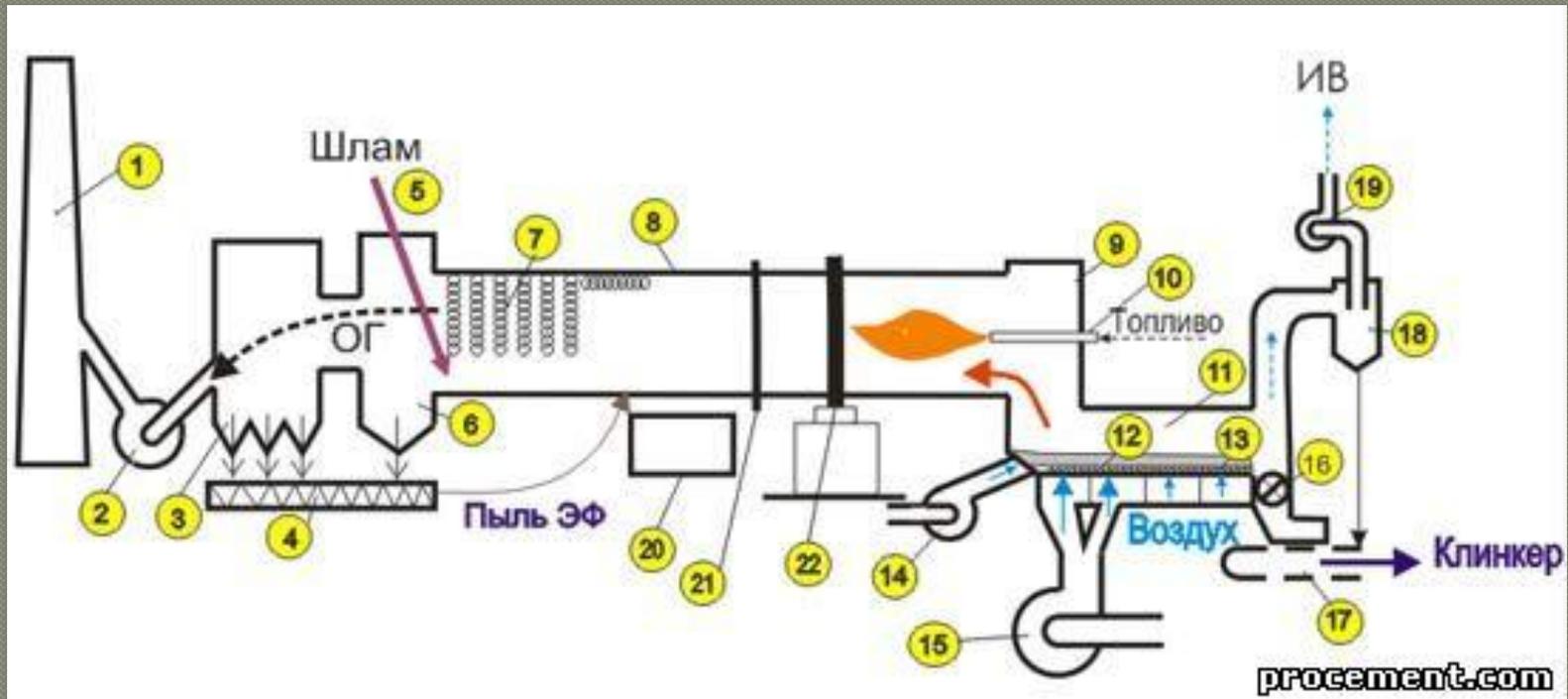
проводят исключительно во вращающихся печах



Вращающаяся обжигательная печь

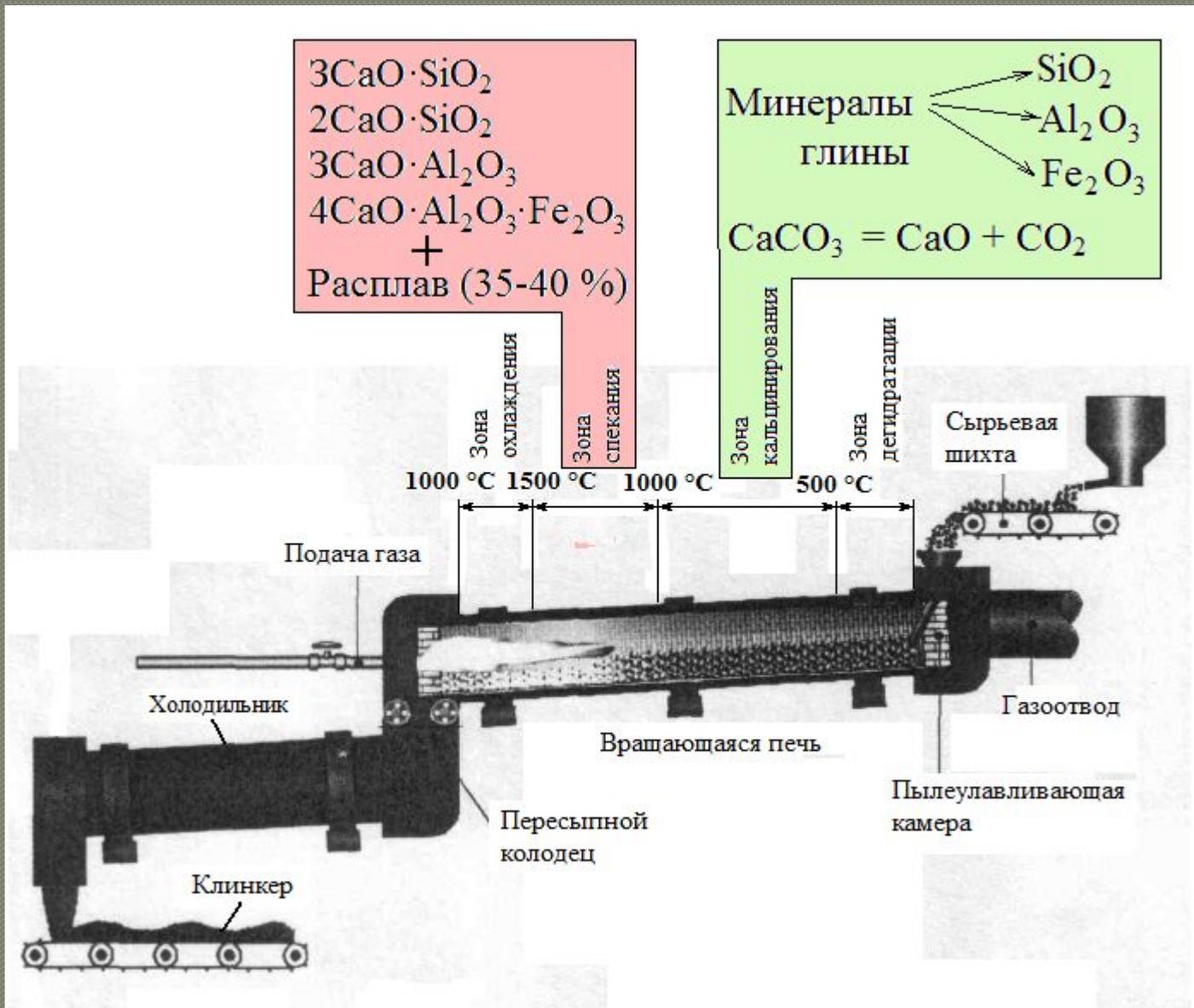


Вращающаяся печь мокрого способа



- 1 - дымовая труба; 2 - дымосос; 3 - электрофильтр; 4 - система пылевозврата; 5 - шламовая труба; 6 - пылеулавливающая камера; 7 - цепная завеса; 8 - вращающаяся печь; 9 - головка печи; 10 - топливная форсунка; 11 - колосниковый холодильник; 12 - решетка горячей камеры; 13 - решетка холодной камеры; 14 - вентилятор острого дутья; 15 - вентилятор общего дутья; 16 - клинкерная дробилка; 17 - клинкерный транспортер; 18 - осадительный циклон; 19 вентилятор избыточного воздуха.

Процессы при обжиге

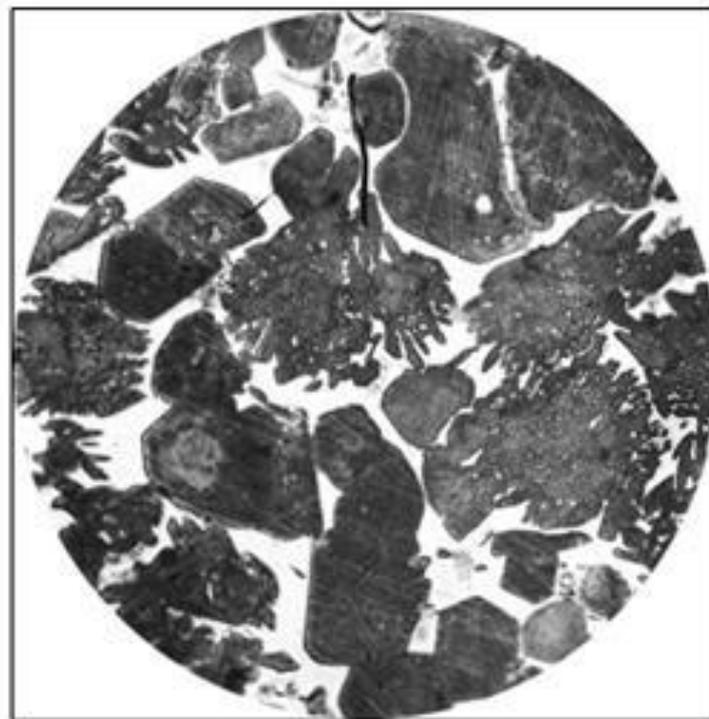
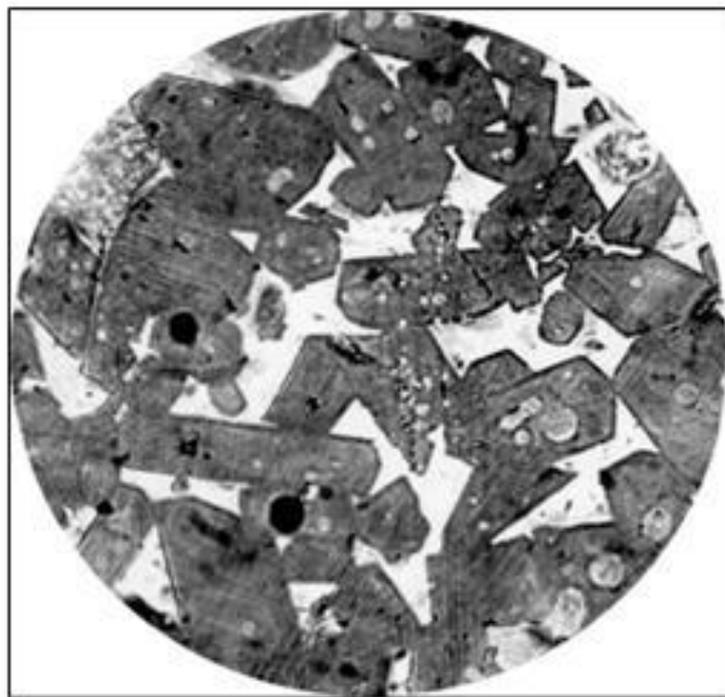


Получение портландцемента

Портландцементный клинкер



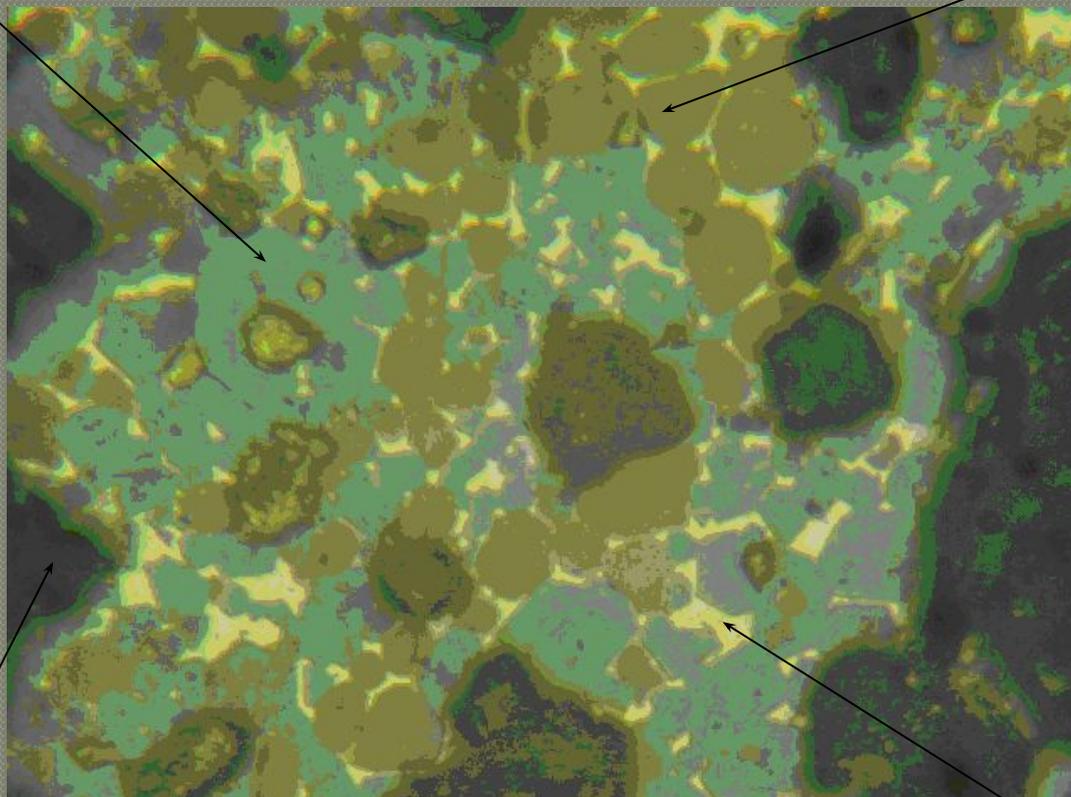
Микроструктура портландцементного клинкера



Микроструктура портландцементного клинкера

Алит

Белит



Алюминат

Целит

Минералы портландцементного клинкера

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - *трехкальцевый силикат*

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - *двухкальцевый силикат*

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - *трехкальцевый алюминат*

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ - *четырекальцевый*

алюмоферрит

Минералы портландцементного клинкера

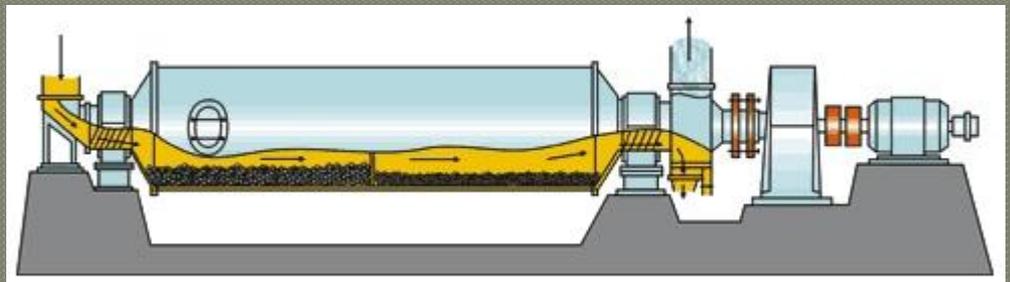
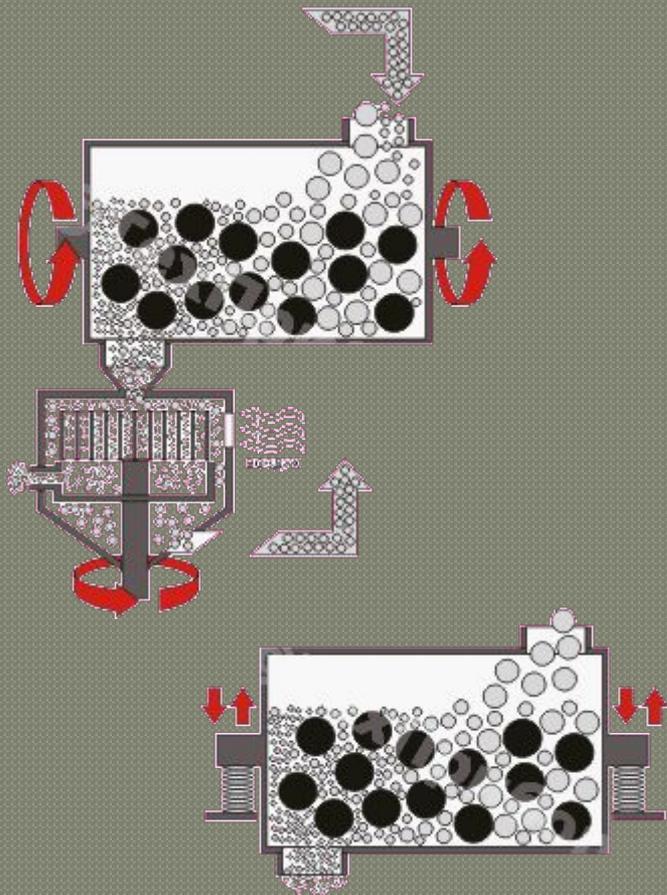


Минералы портландцементного клинкера

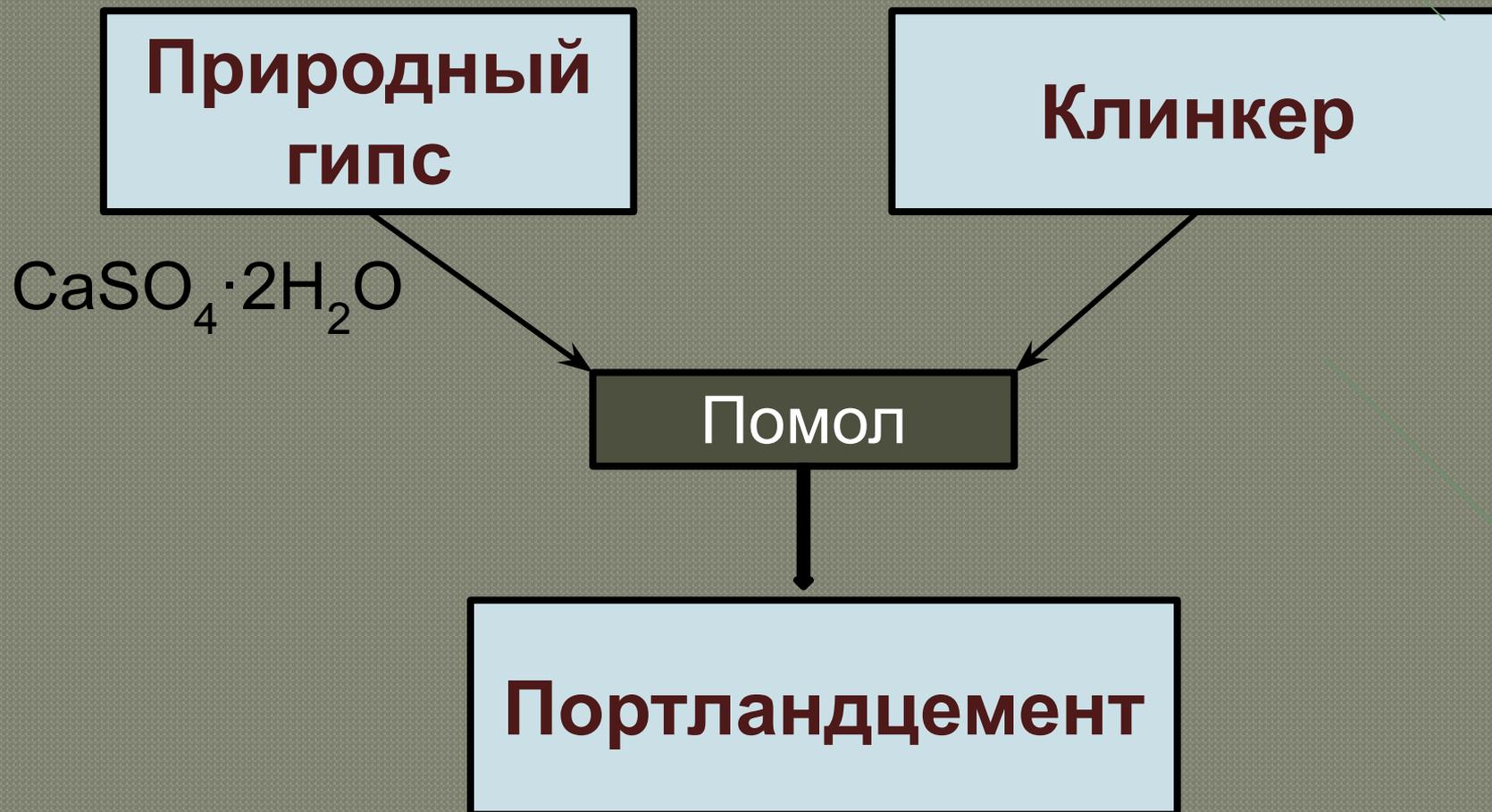
Минерал портландцементного клинкера	Соединение, отождествляемое с минералом	Сокращенное обозначение	Содержание в нормальном клинкере, %	Продукты гидратации	Теплота в кДж, выделяемая 1 % минерала в 1 кг портландцемента к возрасту в сутках	
					7	90
Алит	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	37,5-60	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{C}_2\text{SH}_2$	4,58	4,95
Белит	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	37,5-15	C_2SH_2	0,97	0,97
Алюминат	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	7-15	C_3AH_6	8,66	10,29
Целит	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	18-10	$\text{C}_3\text{AH}_6 + \text{CFH}$	-1,73	1,39
		Сумма	100			

$\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$

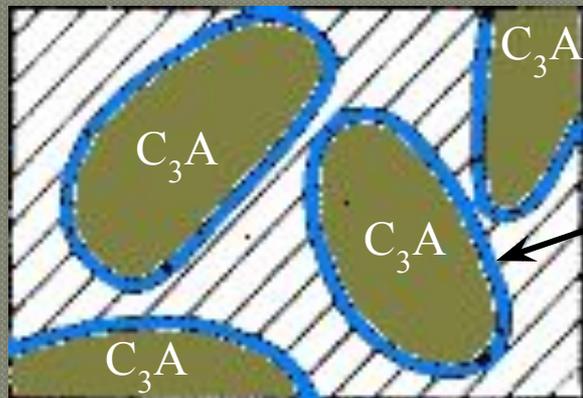
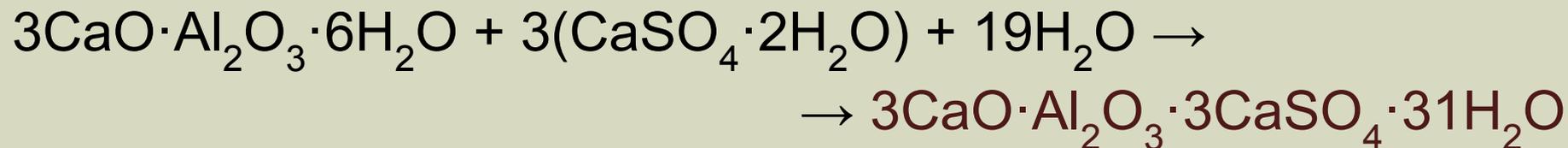
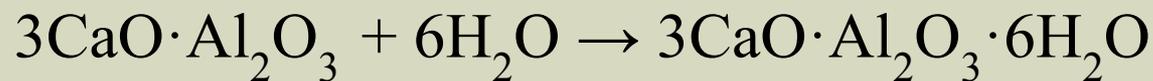
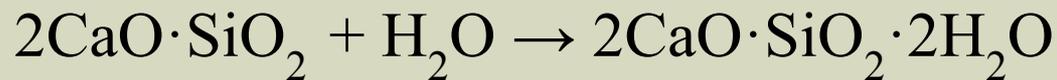
Помол клинкера



Помол клинкера с добавкой гипса

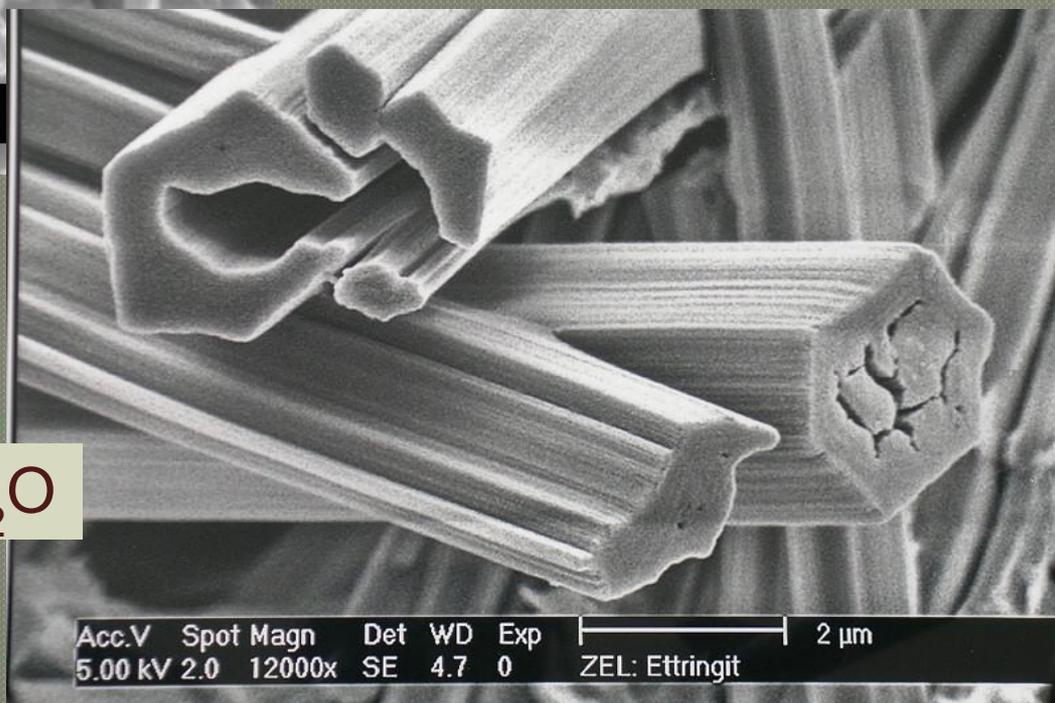
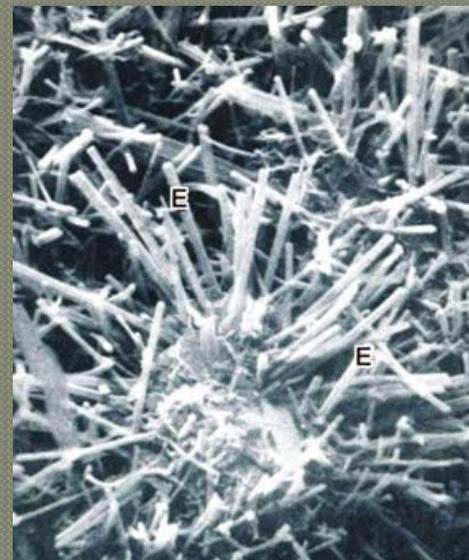
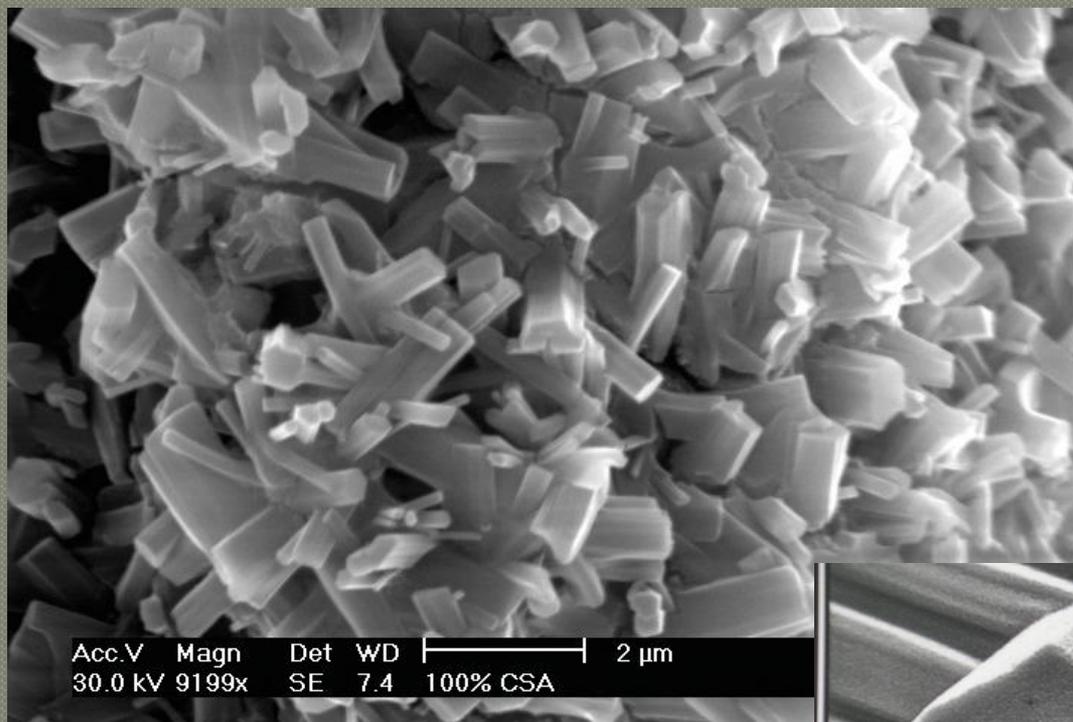


Химические процессы при гидратации портландцемента



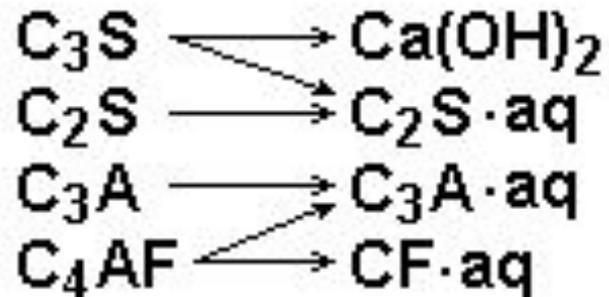
Гидросульфоалюминат кальция
(эттрингит)

Гидросульфоалюминат кальция (этtringит)

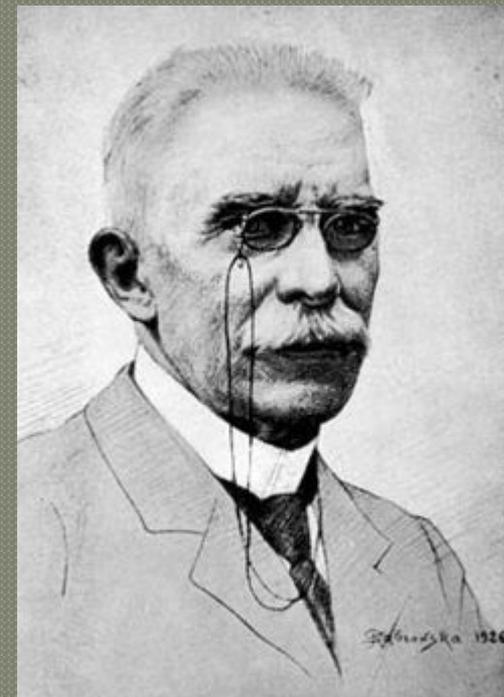
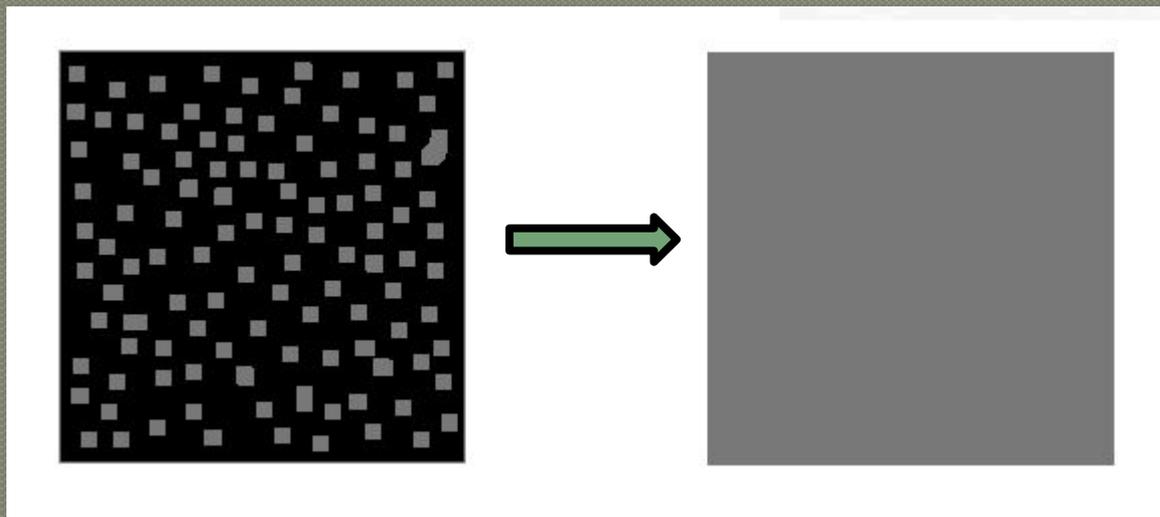


Химические процессы при гидратации портландцемента

Схема гидратации составляющих портландцемента



Физические процессы при твердении портландцемента



Анри Луи Ле Шателье
(1850-1936) –
французский физик и
химик

Кристаллизационная теория Ле-Шателье

1882 г.

Реакция гидратации строительного гипса

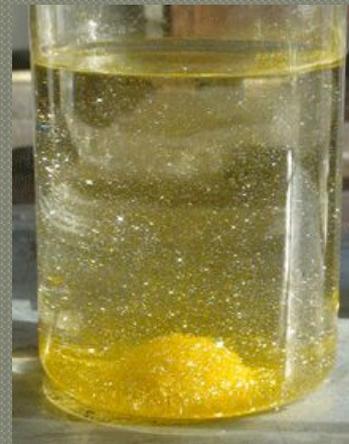


2,05 г CaO на 1 л воды

7,4 г CaO на 1 л воды



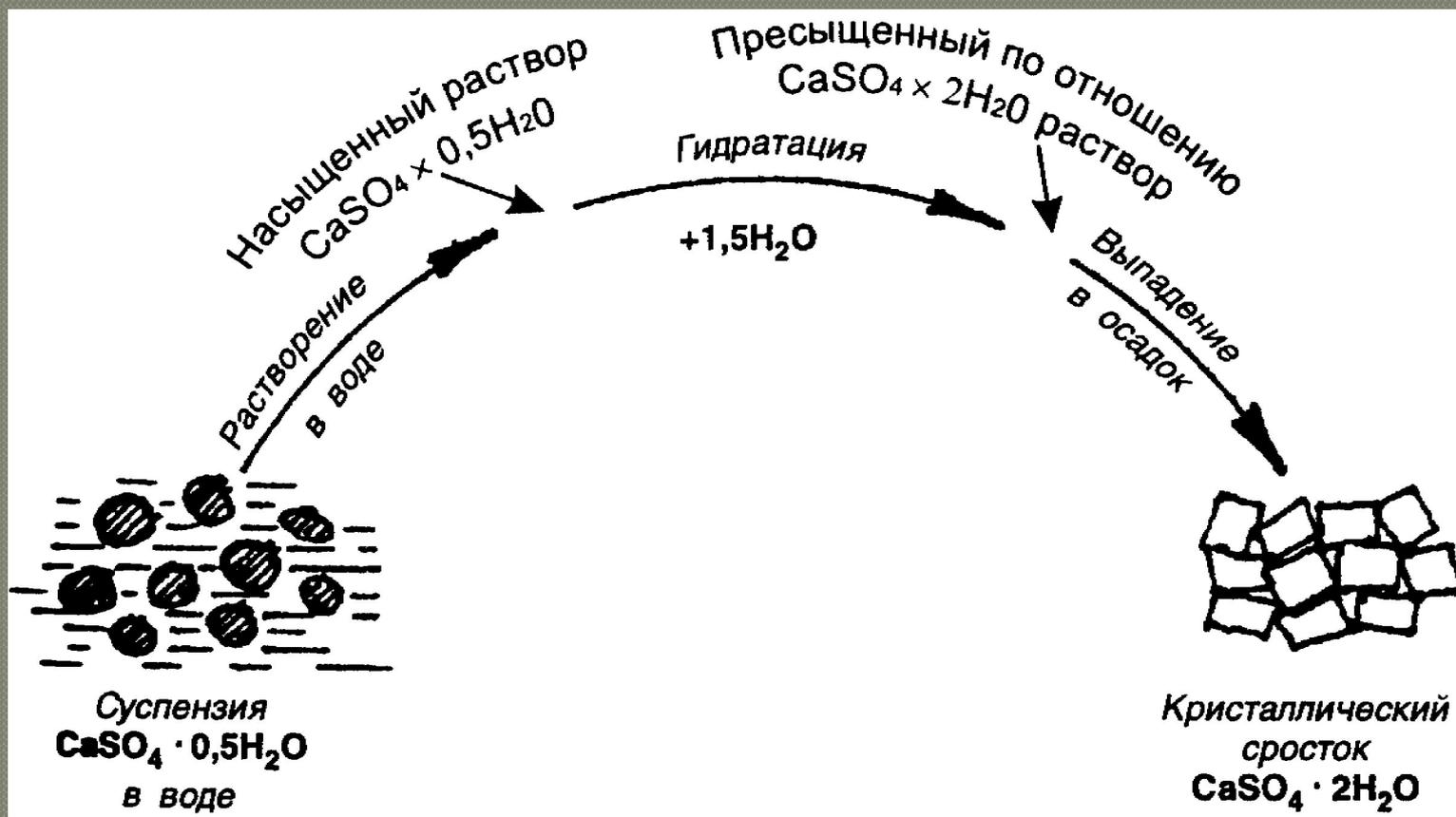
2,05 г CaO/л
↑
CaSO₄ · 0,5H₂O



CaSO₄ · 2H₂O
↓
7,4 г CaO/л

Кристаллизационная теория Ле-Шателье

1882 г.



2,05 г CaO/л



РАСТВОРИМОСТЬ



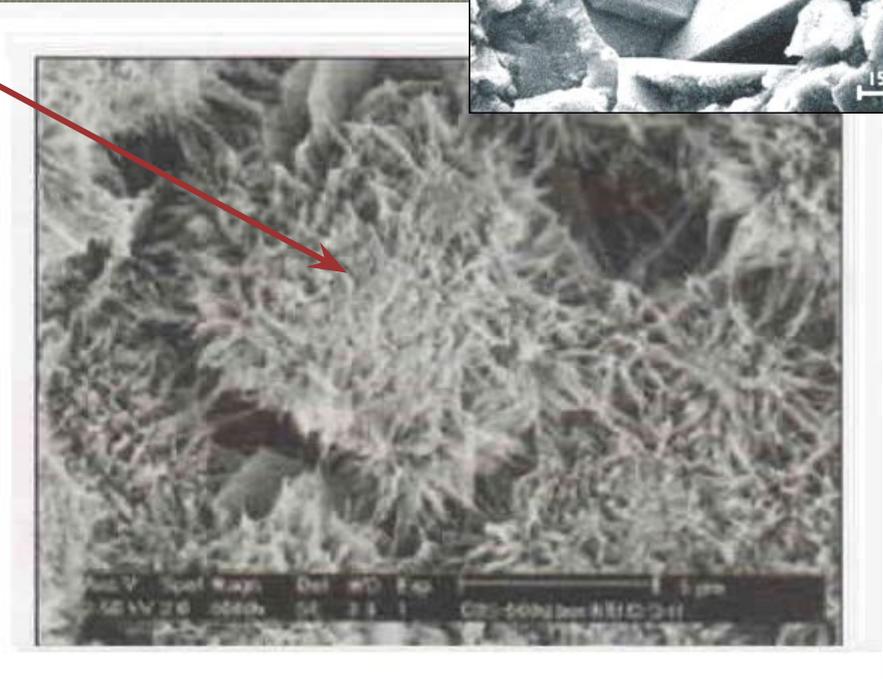
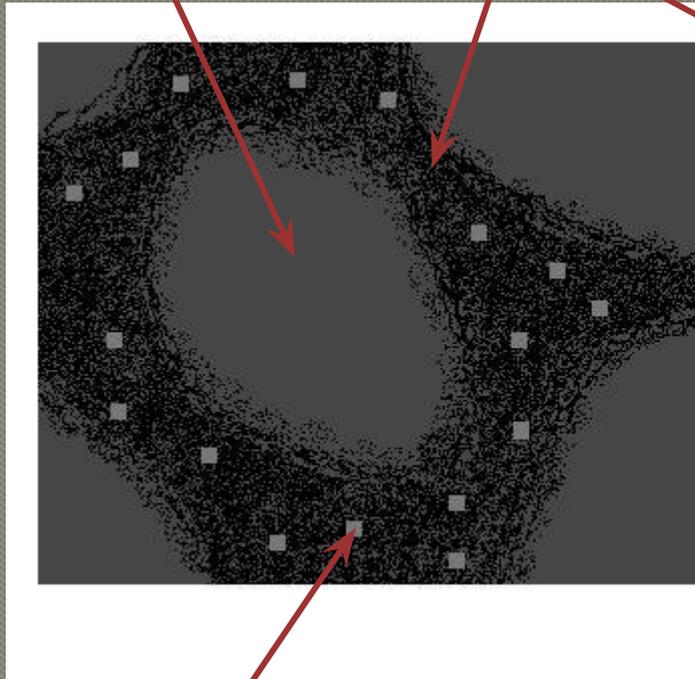
7,4 г CaO/л

Коллойдная теория Михаэлиса 1893 г.

Зерна
цемента

Гель

Кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Теория А.А.Байкова 1925 г.

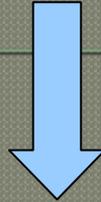
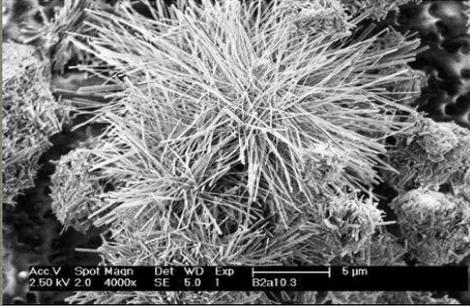


**Алекса́ндр
Алекса́ндрович
Байко́в**
(1870-1946) —
русский металлург
и химик

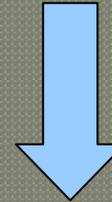
Терминология

Цемент + вода = тесто

(паста)



Паста + Песок =



Раствор + Заполнители =
бетон



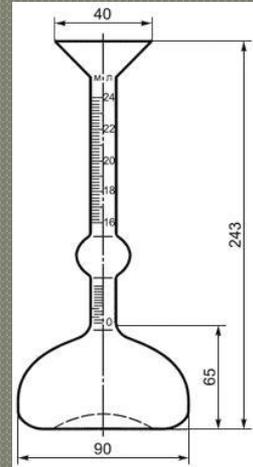
Свойства портландцемента

1. Истинная плотность – $3,05-3,20 \text{ г/см}^3$.
2. Тонкость помола:
 - удельная поверхность $2500-3000 \text{ см}^2/\text{г}$;
 - остаток на сите № 008 $\leq 15 \%$ от массы пробы.

Прибор Блейна



Колба Ле Шателье



Сито № 008 (0,08 мм)



Свойства портландцемента

3. Водопотребность – 24-30 %

Водопотребность – количество воды, необходимое для получения теста нормальной густоты



Прибор Вика

Зависимость прочности цементного камня (раствора, бетона) от количества добавленной воды по отношению к массе цемента



Свойства портландцемента

4. Сроки схватывания

начало схватывания - не ранее 45 мин.,

конец схватывания - не позднее 10 ч от начала затворения.

Схватывание ускоряется при повышении тонкости помола цемента и содержания в нем C_3A .



Прибор Вика



Автоматический прибор Вика

Свойства портландцемента

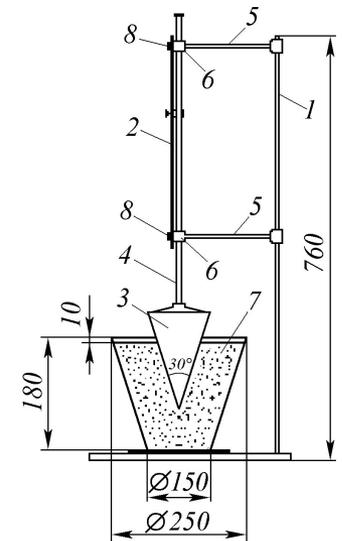
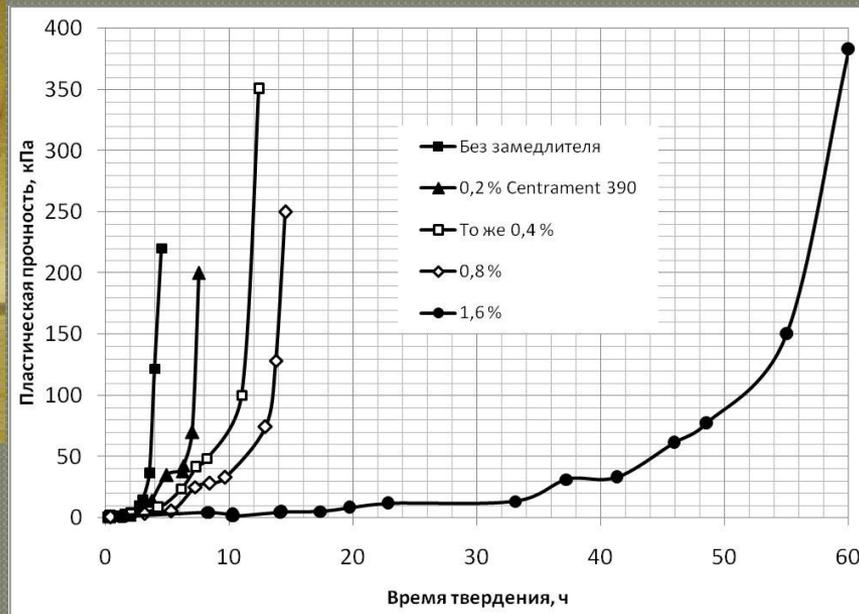
4. Сроки схватывания

С помощью добавок схватывание цемента можно ускорить или замедлить



Пенетрометр

Влияние добавки-замедлителя «Центрамент Ретард 390» на пластическую прочность цементной пасты



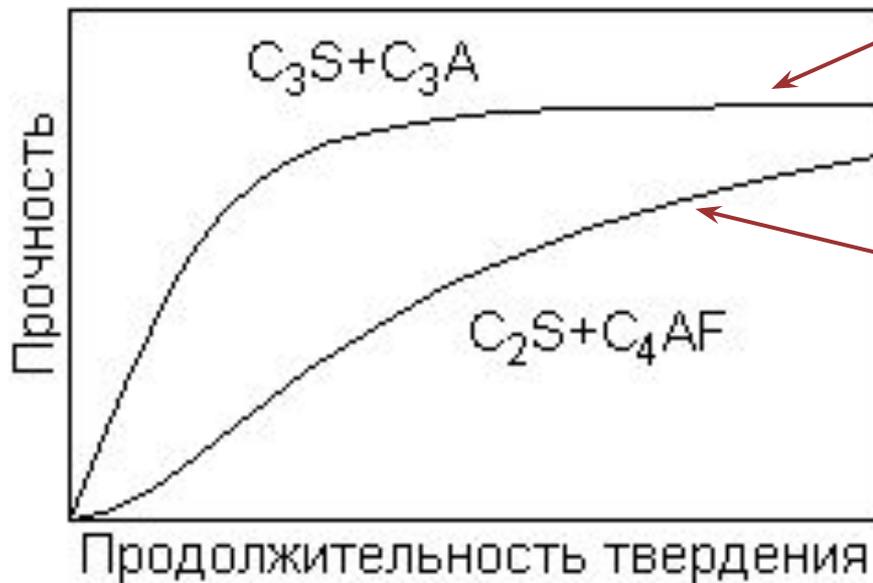
Конус СтройЦНИЛ

Свойства портландцемента

5. Скорость твердения

Скорость твердения портландцемента возрастает с повышением тонкости помола и температуры.

Влияние минералогического состава клинкера на скорость твердения портландцемента

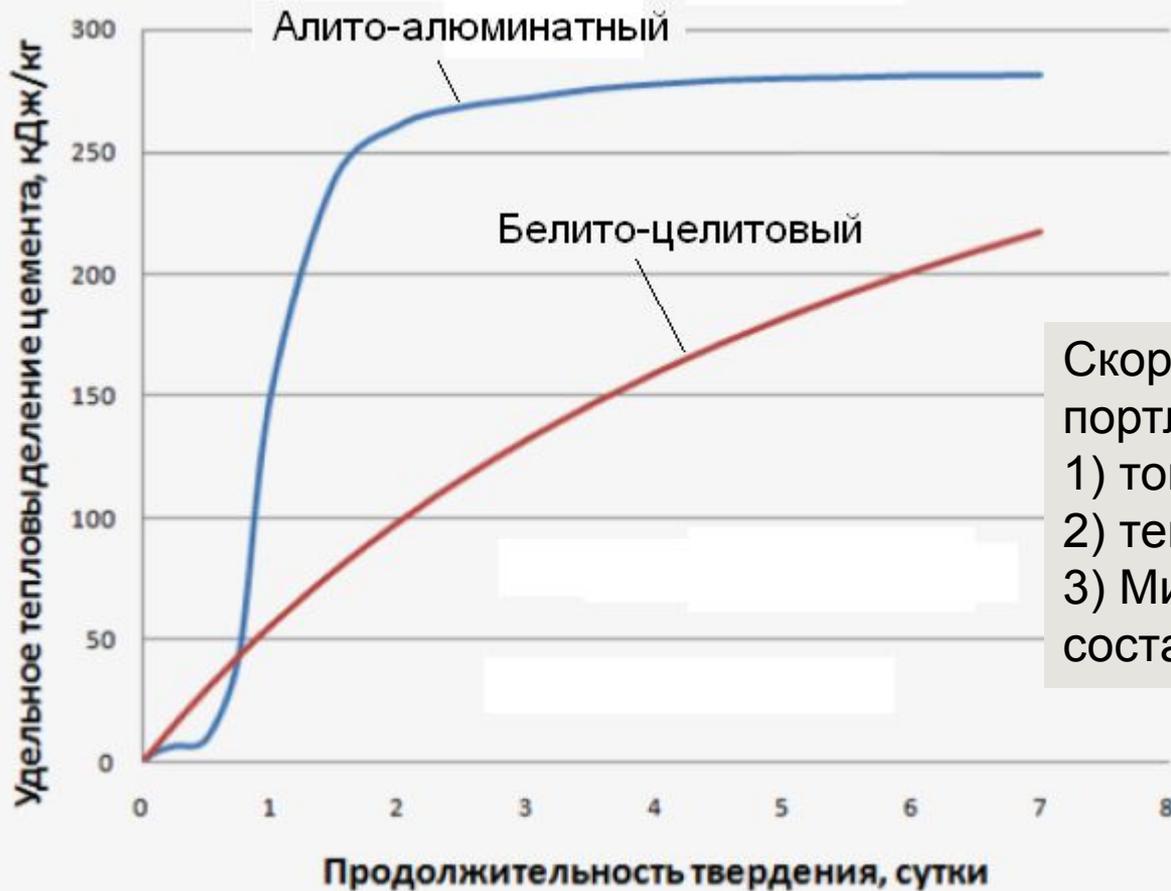


Алиито-алюминатный пц

Белито-целитовый пц

Свойства портландцемента

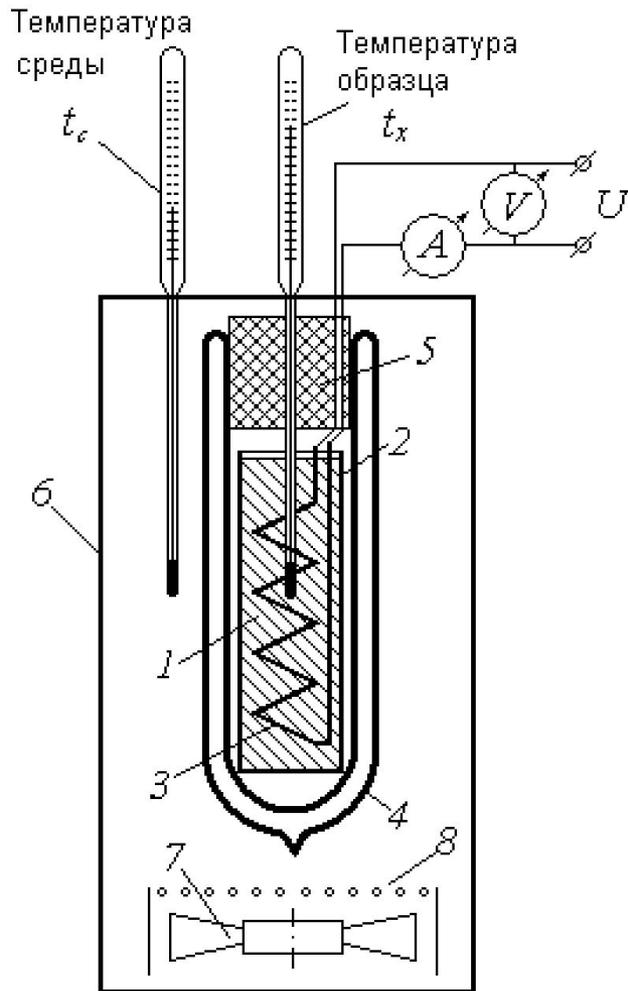
6. Тепловыделение



Скорость тепловыделения портландцемента зависит от:

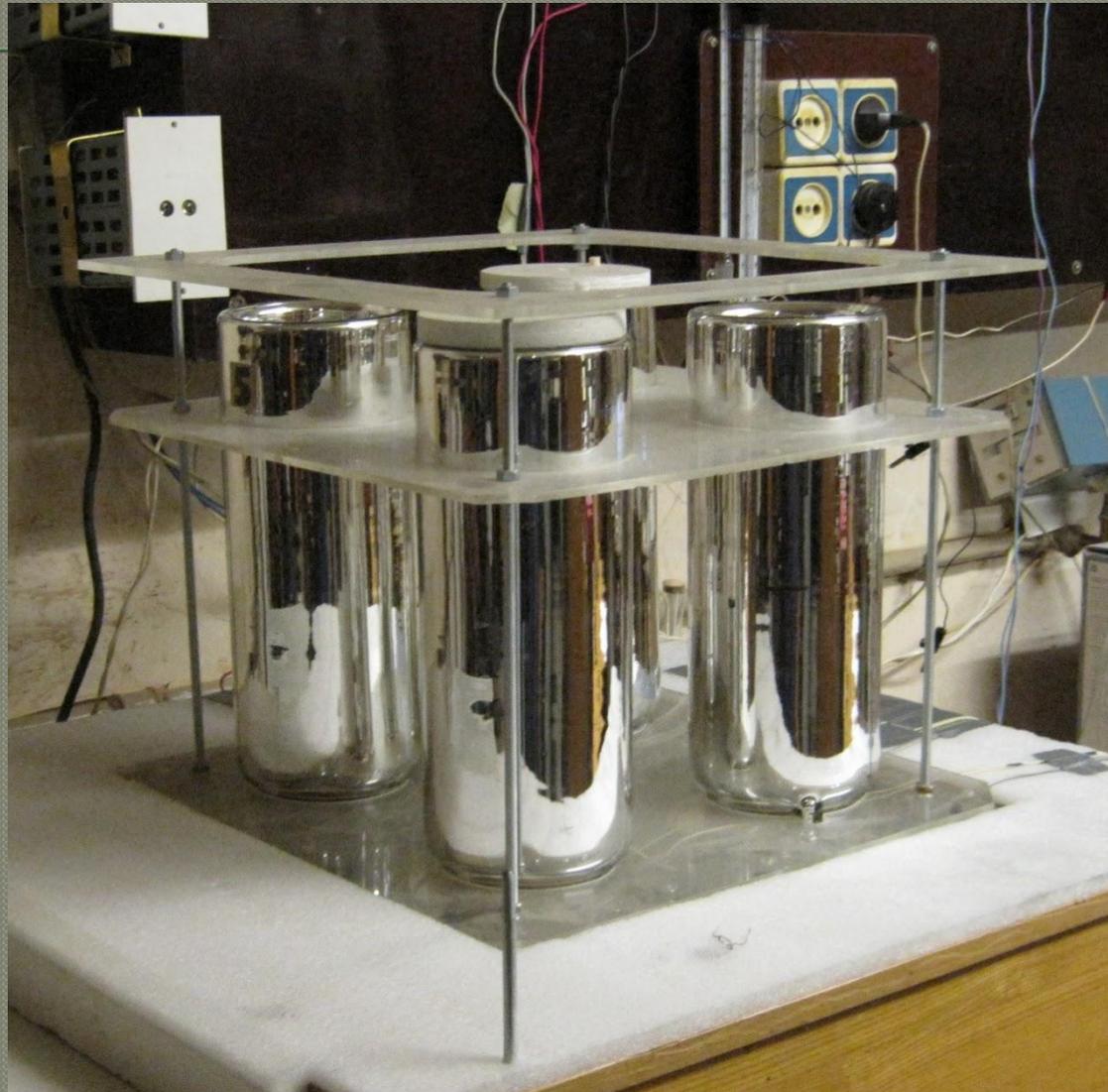
- 1) тонкости помола;
- 2) температуры;
- 3) Минералогического состава

Термосный калориметр для определения тепловыделения цемента



- 1 – образец бетона;
- 2 – металлический стакан;
- 3 – нагревательная проволока;
- 4 – сосуд Дьюара;
- 5 – пенопластовая пробка;
- 6 – термостат;
- 7 – вентилятор;
- 8 – нагреватель

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТИ БЕТОНА



Свойства портландцемента

7. Усадка и набухание

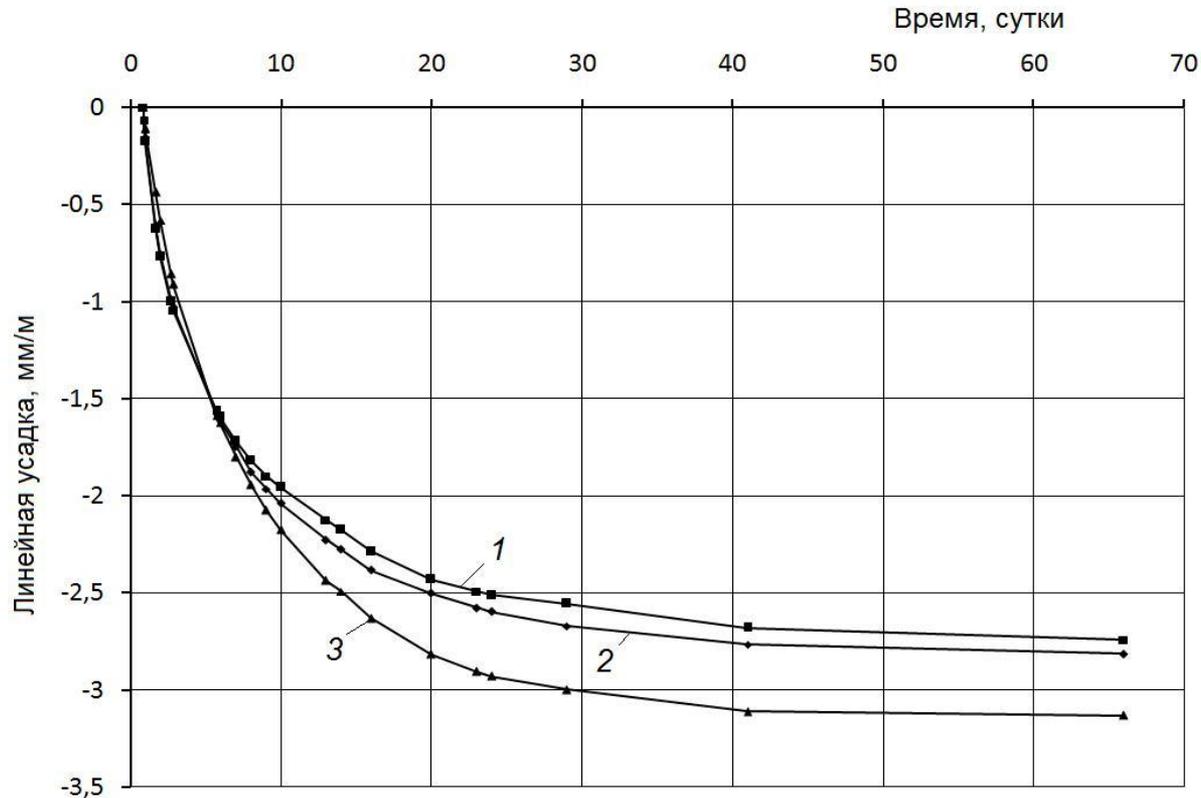


Рис. 2. Усадка цементных образцов в воздушно-сухих условиях при температуре 20 °C: 1 - CEM I 52,5N; 2 - CEM I 42,5N "Akmenes cementas" (Литва); 3 - CEM I 42,5N "Semex" (Латвия)

Определение воздушной усадки



Свойства портландцемента

8. Активность цемента (прочностные свойства цемента)

Активностью цемента называют предел прочности при сжатии стандартных образцов-балочек 40x40x160 мм, выполненных из цементного раствора состава 1:3 с нормальным песком, выдержанных при $t=(20\pm 2)^\circ\text{C}$: 1 сутки во влажной ($\phi\geq 96\%$), остальное время в воде и испытанных в возрасте 28 суток сначала на изгиб, а затем половинки образцов на сжатие.

$$R_{\text{ц}} = 30\div 60 \text{ МПа}$$

Трехсекционная форма для стандартных образцов

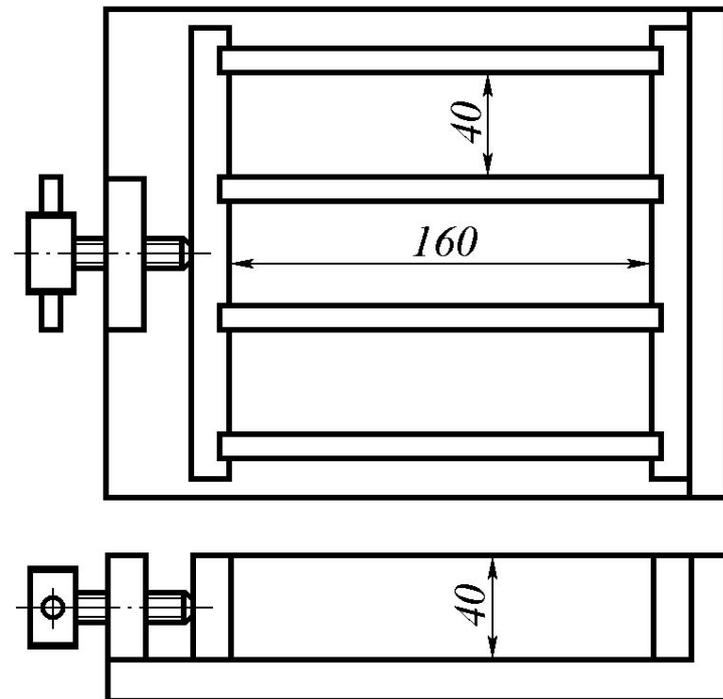
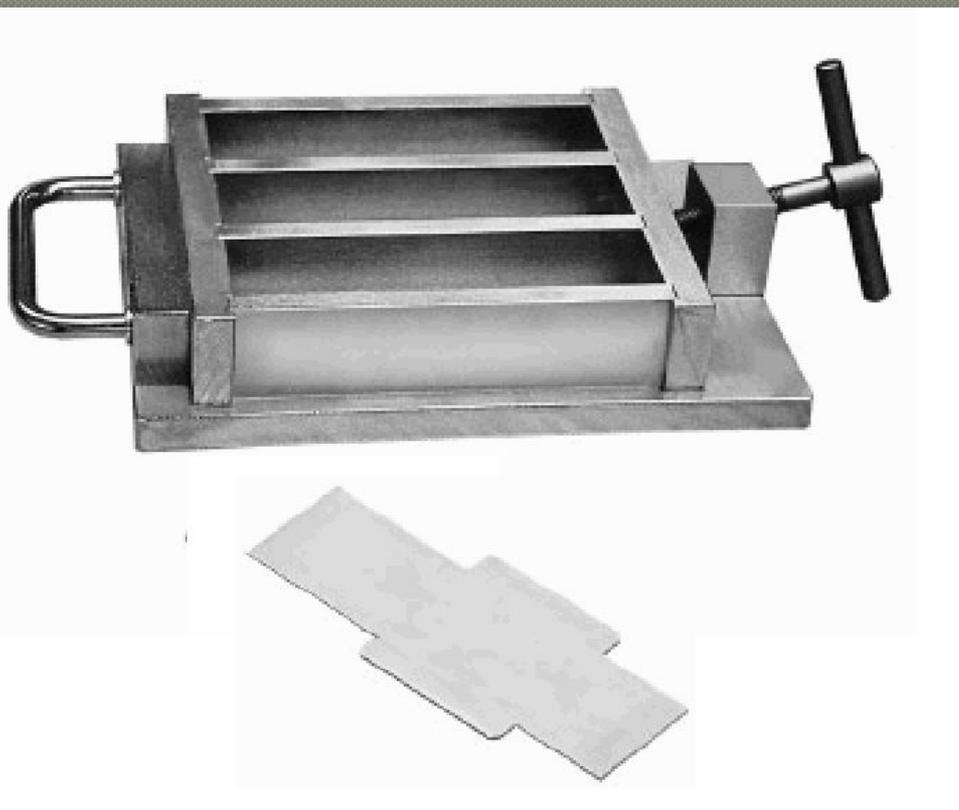


Рис. 3.7. Разборная форма для изготовления образцов-балочек

Испытание на изгиб

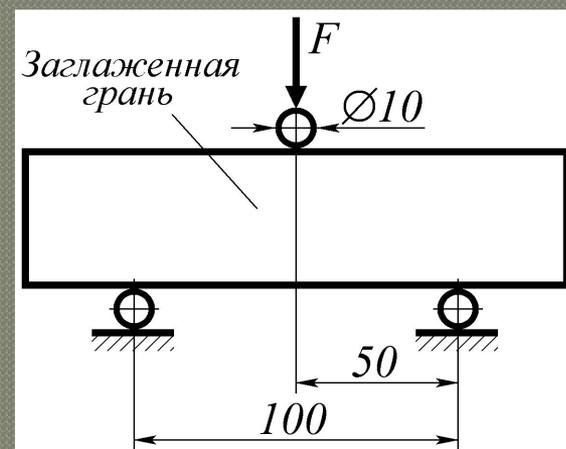


Рис. 3.8. Схема испытания образца-балочки на изгиб

Испытание на изгиб



Прибор МИИ-100 для испытания на изгиб



Испытание на сжатие

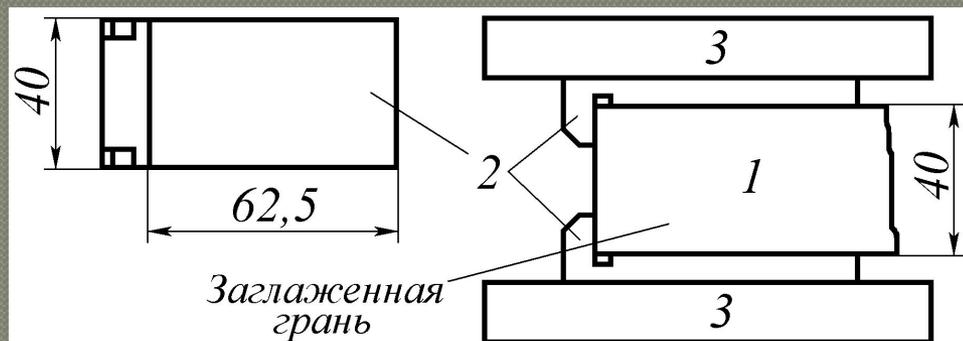
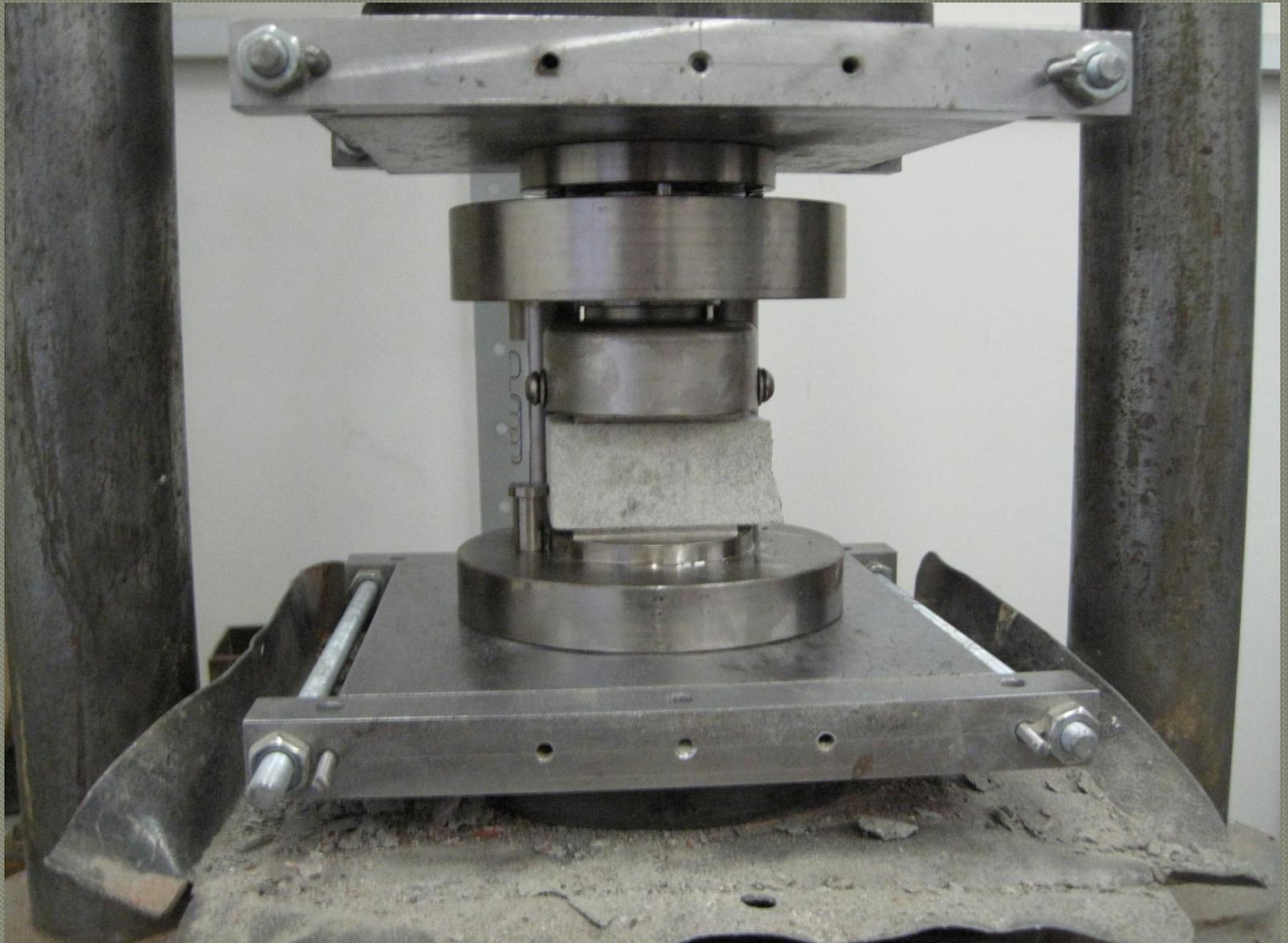


Рис. 3.9. Схема испытания половинок балочек на сжатие: 1 – половинка балочки; 2 – стандартные пластины; 3 – плиты прессы

Испытание на сжатие



Пресс гидравлический ПСУ-50А, ЗИМ г. Армавир



Создаваемое
усилие

0 - 20 тс,

0 - 50 тс.

Погрешность 2 %

Стандартный смеситель для цементного раствора

По ГОСТ 30744 перемешивают:

- 1) 30 с цемент с водой на малой скорости,
- 2) с песком на большой скорости по режиму: 30– 90– 60 с



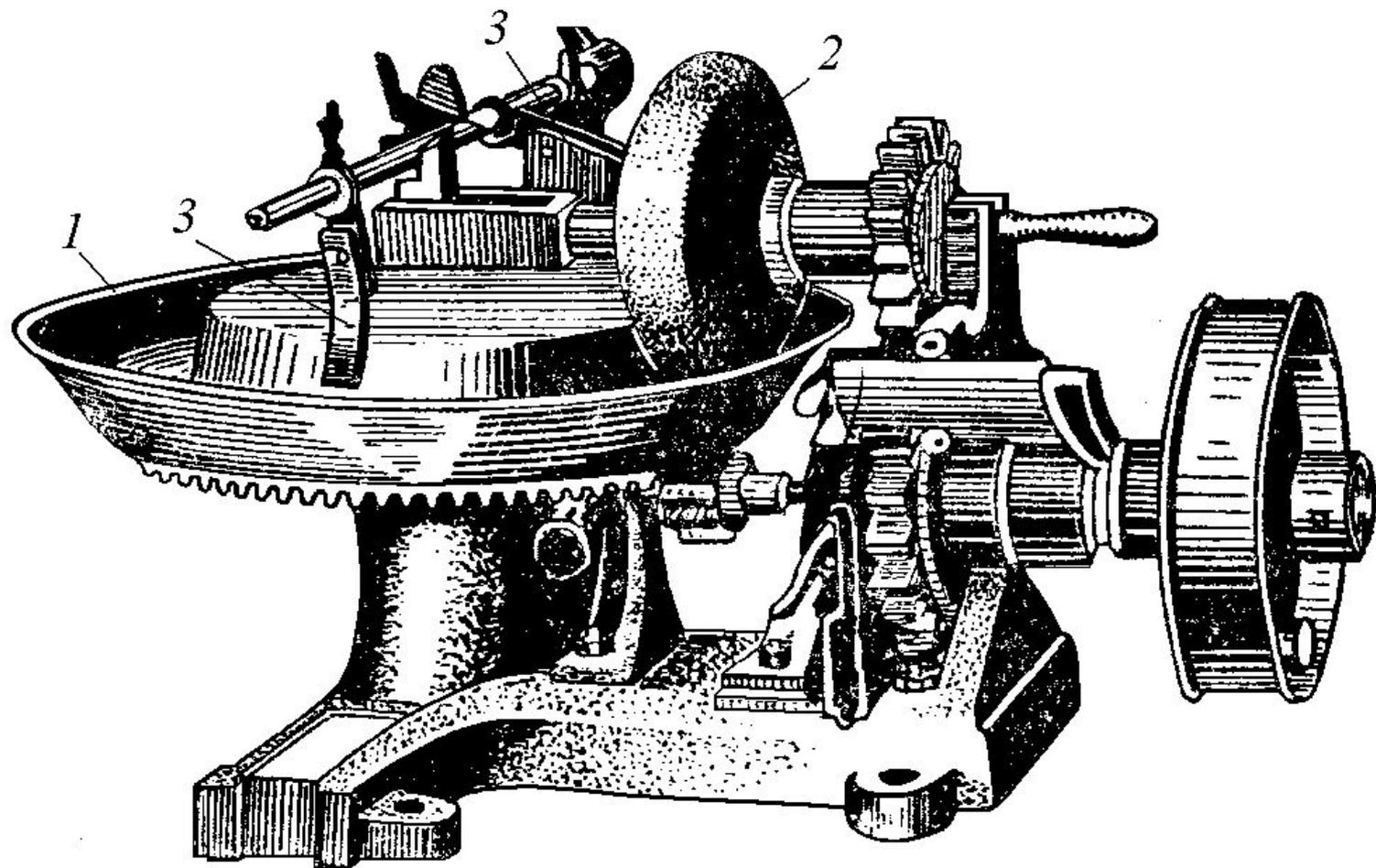
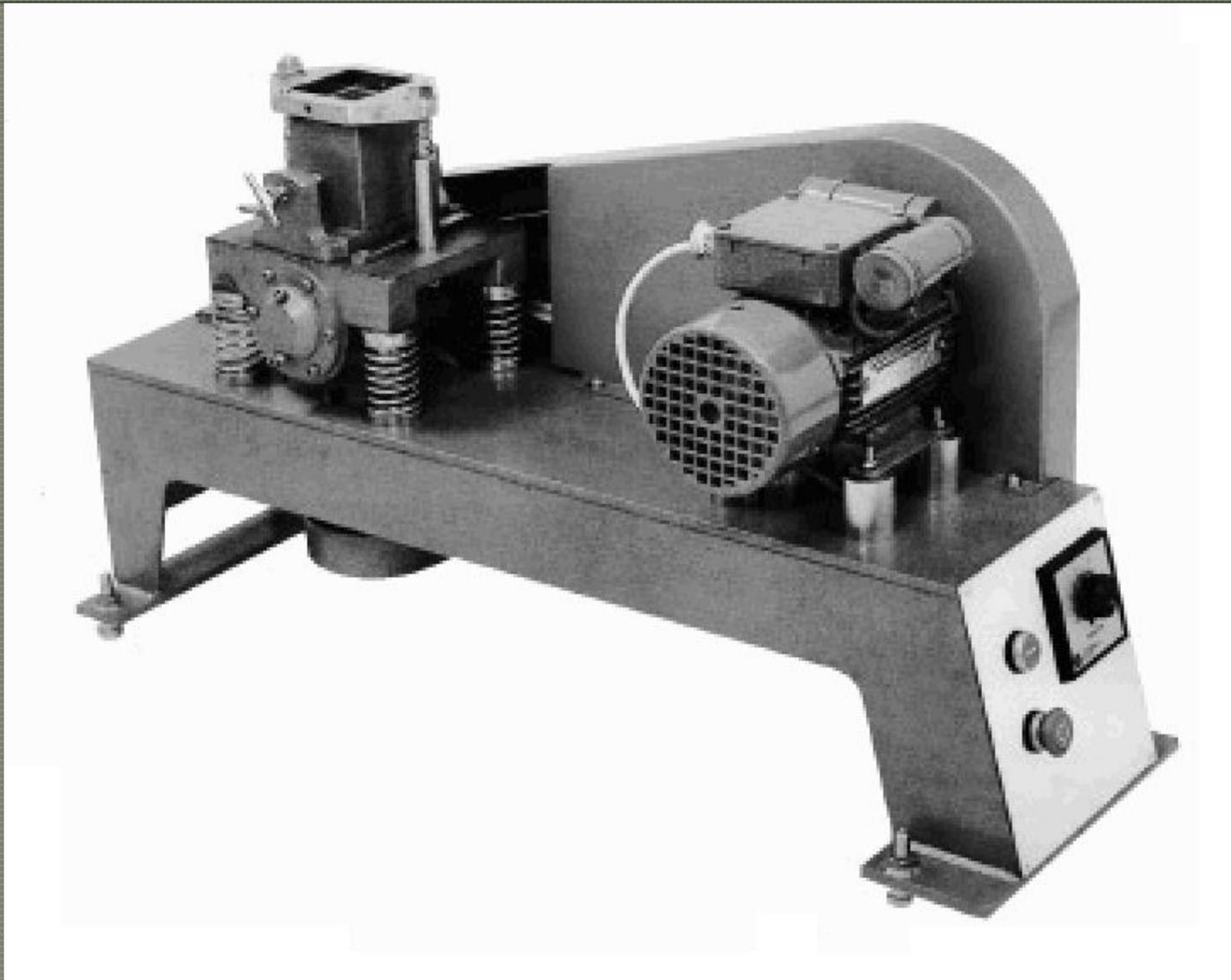


Рис. 8.6. Стандартная растворомешалка: 1 – вращающаяся чаша; 2 – перетирающий валик; 3 – переворачивающие лопасти

Определение нормальной густоты (водопотребности) цементного раствора



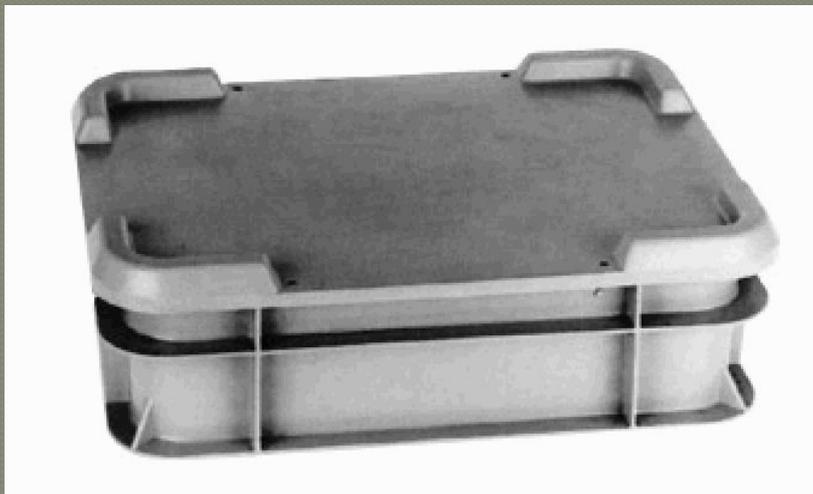
Уплотнение образцов по ГОСТ 310-80 производится на стандартной виброплощадке в течение 3 мин.



Уплотнение образцов по ГОСТ 30744-2001 производится с помощью встряхивающего устройства двумя циклами (для каждого из двух слоев производится по 60 падений с высоты 15 мм)



Хранение образцов-балочек из цементного раствора



Хранение образцов-балочек из цементного раствора



Хранение образцов-балочек из цементного раствора



ГОСТ 310.1-76 Цементы. Методы испытаний. Общие положения
 ГОСТ 310.2-76 Цементы. Методы определения тонкости помола
 ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема
 ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии
 ГОСТ 310.5-88 Цементы. Метод определения тепловыделения
 ГОСТ 310.6-85 Цементы. Метод определения водоотделения
 ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия

ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка
 ГОСТ 30515-97 Цементы. Общие технические условия
 ГОСТ 31108-2003 Цементы общестроительные. Технические условия
 ГОСТ 6139-2003 Песок для испытаний цемента. Технические условия

Технические требования к цементам согласно ГОСТ 10178-85

1. Требования к маркам цемента

Марка		300	400	500	550	600
Предел прочности, МПа, должен быть не менее	при изгибе	4,5	5,5	6,0	6,2	6,5
	при сжатии	30,0	40,0	50,0	55,0	60,0

2. Начало схватывания цемента должно наступать не ранее 45 мин, а конец схватывания – не позднее 10 часов от начала затворения.

3. Цементы должны показать равномерность измерения объема.

4. Остаток на сите № 008 не должен превышать 15 % от массы пробы.

Технические требования к цементам согласно ГОСТ 31108-2003

По прочности на сжатие цементы подразделяются на классы: 22,5; 32,5; 42,5; 52,5, а по скорости твердения – на два подкласса: Н – нормально твердеющий и Б – быстротвердеющий.

Класс цемента	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сутки, не менее			Начало схватывания, мин, не ранее	Показатель равномерности и изменения объема z, мм, не более
	2	7	28		
22,5 Н	-	11	22,5	75	10
32,5 Н	-	16	32,5		
32,5 Б	10	-		42,5	
42,5 Н	10	-	60		
42,5 Б	20	-		52,5	
52,5 Н	20	-	45		
52,5 Б	30	-			

Требования к вещественному составу цементов по ГОСТ 31108-2003

Наименование цемента	Сокращенное обозначение	Вид минеральной добавки	Содержание добавки, %
Портландцемент	ЦЕМ I	-	-
Портландцемент с добавкой шлака	ЦЕМ II/A-Ш ЦЕМ II/B-Ш	Доменный или электротермофосфорный гранулированный шлак	6-20 21-35
То же с пуццоланой	ЦЕМ II/A-П	Пуццолана	6-20
То же с золой-уноса	ЦЕМ II/A-З	Зола-уноса	6-20
То же с глиежем или обожженным сланцем	ЦЕМ II/A-Г	Глиеж или обожженный сланец	6-20
То же с микрокремнеземом	ЦЕМ II/A-МК	Микрокремнезем	6-20
То же с известняком	ЦЕМ II/A-И	Известняк	6-20
Композиционный портландцемент**	ЦЕМ II/A-К	Любая из минеральных добавок	6-20
Шлакопортландцемент	ЦЕМ III/A ЦЕМ III/B ЦЕМ III/C	Доменный или электротермофосфорный гранулированный шлак	36-65 66-80 81-95
Пуццолановый цемент**	ЦЕМ IV/A ЦЕМ IV/B	Пуццолана или зола-уноса или глиеж или обожженный сланец или микрокремнезем	21-35 36-55
Композиционный цемент **	ЦЕМ V/A	Доменный или электротермофосфорный гранулированный шлак + Пуццолана или зола-уноса	11-30 + 11-30
	ЦЕМ V/B		31-50 + 31-50

Оценка равномерности изменения объема ГОСТ

310



Рис. 3.3. Ванна с гидравлическим затвором



Рис. 3.4. Образцы, не выдержавшие испытания



Оценка равномерности изменения объема ГОСТ 30744-2001

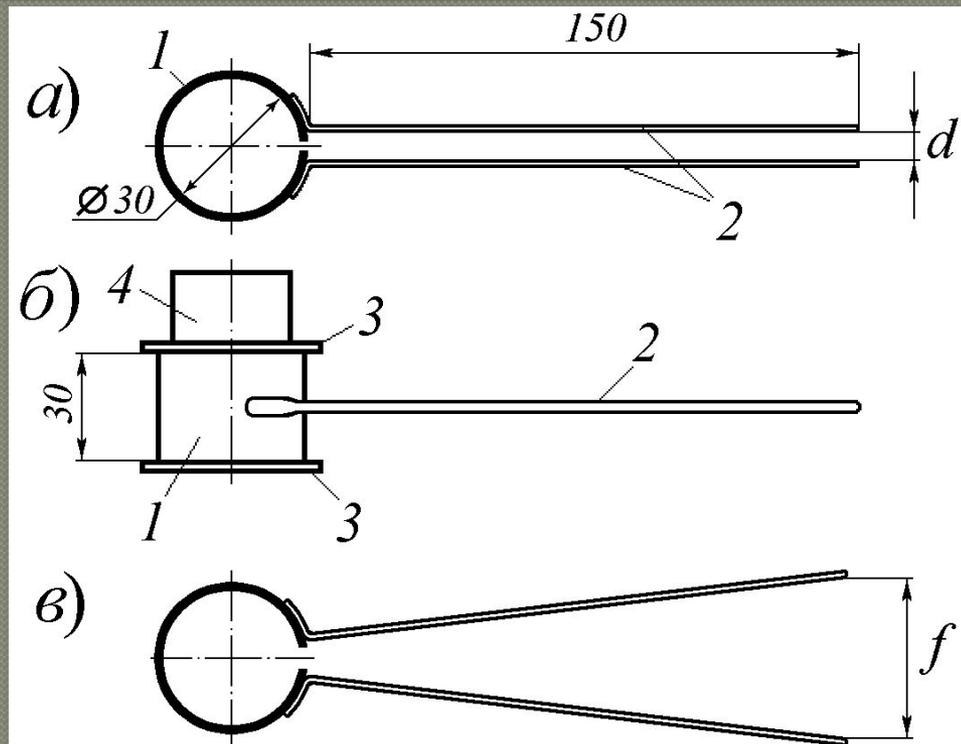


Рис. 3.5. Кольцо Ле Шателье: а – вид сверху; б – вид сбоку; в – после расширения образца; 1 – кольцо с прорезью; 2 – индикаторная игла; 3 – стеклянная пластинка; 4 – пригруз

Оценка равномерности изменения объема ГОСТ 30744-2001



Оценка равномерности изменения объема ГОСТ 30744-2001



Оценка равномерности изменения объема ГОСТ 30744-2001

