



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШНПТ

_____ **К.К. Манабаев**

«___» _____ **2022 г.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ
СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И ПОЛУЧЕНИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО
КЛИНКЕРА**

Методические указания к выполнению лабораторной и
самостоятельной работы по курсу

«Основы технологии вяжущих материалов»

для студентов направления подготовки **магистров**

18.04.01 Химическая технология

Томск 2022

УДК 666.9

**Исследование состава, свойств цементных сырьевых смесей и получение
портландцементного клинкера**

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной
работы по курсу «Основы технологии вяжущих материалов» для студентов
направления подготовки магистров 18.04.01 Химическая технология

Томск: Изд. ТПУ, 2022. - 27 с.

Составители: **д.т.н. Лотов В.А**
к.т.н. Сударев Е.А.
к.т.н. Кутугин В.А.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром НОЦ
Н.М Кижнера

« ____ » _____ 2022 г.

Заведующий кафедрой - руководитель
научно-образовательного центра
на правах кафедры, д.х.н, профессор _____ Е.А. Краснокутская

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ТПУ
В.И. Верецагин

© Составление ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2022

Состав, свойства цементных сырьевых смесей, получение и свойства портландцементного клинкера

Современный цементный завод является высокомеханизированным предприятием, оснащенным сложным технологическим оборудованием, выпускающим цементы различного ассортимента для нужд народного хозяйства. Управление сложным технологическим процессом получения цемента с заданными строительно-техническими свойствами можно осуществить только при детальном знании процессов, происходящих на различных технологических стадиях переработки исходных сырьевых материалов и их смесей. Второй важной составляющей управления качеством получаемого продукта является знание технологического регламента, оптимальные значения и пределы изменений основных контролируемых параметров на каждой технологической стадии процесса. Часть этих знаний можно приобрести при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Технология цемента», охватывающего весь технологический цикл процесса получения цемента, начиная с расчетов и приготовления сырьевой смеси и заканчивая получением клинкера, цемента и исследованием его основных строительно-технических свойств.

Лабораторная работа 1. Расчет состава цементной сырьевой смеси

Цель работы: рассчитать сырьевую смесь для получения клинкера с заданными характеристиками из сырьевых компонентов с известным химическим составом и определить количественное соотношение этих компонентов.

1. Общие положения

При изготовлении портландцемента (ПЦ) сырьевая смесь составляется из 2–4 компонентов. В качестве основных используются карбонатный и глинистый компоненты, а требуемый химический состав сырьевой смеси достигается путем введения корректирующих добавок. Правильно произведенный расчет сырьевой смеси является одним из важнейших условий получения клинкера с заданными характеристиками. Расчет сырьевой смеси заключается в определении соотношений между ее компонентами на основе химического состава сырьевых материалов и заданных характеристик клинкера.

Состав и свойства портландцементного клинкера предопределяется следующими характеристиками:

- химическим составом клинкера;
- значениями коэффициента насыщения и модулей;
- содержанием основных клинкерных минералов.

Содержание главных оксидов в клинкере колеблется в следующих пределах: CaO – 62–67 %, SiO_2 – 20–24 %, Al_2O_3 – 4–7 %, Fe_2O_3 – 2–5 %, MgO , SO_3 , R_2O и др. – 1,5–4 %. Коэффициент насыщения КН колеблется в пределах 0,8–0,95, силикатный модуль $n = 1,7$ –3,5, глиноземный модуль $p = 1,0$ –3,0. Величины КН и модулей определяют по следующим формулам:

$$\text{КН} = \frac{\text{CaO} - 1,65 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,35 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,7 \cdot \text{SO}_3}{2,8 \cdot \text{SiO}_2};$$

$$n = \frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)}; \quad p = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

где CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 – содержание оксидов в клинкере, %.

Содержание основных клинкерных минералов в обычном клинкере колеблется в следующих пределах:

$$\text{C}_3\text{S} - 40\text{--}60 \%, \quad \text{C}_2\text{S} - 15\text{--}35 \%, \quad \text{C}_3\text{A} - 4\text{--}14 \%, \quad \text{C}_4\text{AF} - 10\text{--}18 \%$$

Наиболее распространенным является способ расчета по значениям КН и модулей. При расчетах необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) число сырьевых компонентов должно быть на единицу больше числа заданных характеристик;
- 2) для удобства расчетов и повышения их точности химический состав каждого компонента сырьевой смеси пересчитывают на 100 %;
- 3) для упрощения расчетов содержание меньшего по количеству компонента принимается равным единице;
- 4) точность расчетов трехкомпонентной сырьевой смеси – до 0,01 %, четырехкомпонентной – до 0,001 %.

При расчете трехкомпонентной сырьевой смеси задаются двумя характеристиками клинкера: КН и одним из модулей (n , p).

Принимая, что в сырьевой смеси на **1 в.ч.** третьего компонента приходится x **в.ч.** карбонатного (первого) и y **в.ч.** глинистого (второго) компонента, запишем следующие равенства:

$$C_0 = \frac{x C_1 + y C_2 + C_3}{x + y + 1}; \quad A_0 = \frac{x A_1 + y A_2 + A_3}{x + y + 1};$$

$$S_0 = \frac{x S_1 + y S_2 + S_3}{x + y + 1}; \quad F_0 = \frac{x F_1 + y F_2 + F_3}{x + y + 1};$$

где C_0, A_0, S_0, F_0 – содержание оксидов в сырьевой смеси, %;
 C_1, C_2, C_3 и т.д. – содержание оксидов в исходных сырьевых компонентах смеси, %.

Подставляя полученные значения в формулы для расчета КН и n :

$$\text{КН} = \frac{C_0 - 1,65A_0 - 0,35F_0}{2,8S_0}, \quad n = \frac{S_0}{A_0 + F_0},$$

получим систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} & x(C_1 - 2,8S_1 \cdot \text{КН} - 1,65A_1 - 0,35F_1) + \\ & + y(C_2 - 2,8S_2 \cdot \text{КН} - 1,65A_2 - 0,35F_2) = \\ & = 2,8S_3 \cdot \text{КН} + 1,65A_3 + 0,35F_3 - C_3; \\ & x(S_1 - nA_1 - nF_1) + y(S_2 - nA_2 - nF_2) = nA_3 + nF_3 - S_3. \end{aligned}$$

Для удобства расчетов примем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_1 &= C_1 - 2,8S_1 \cdot \text{КН} - 1,65A_1 - 0,35F_1; \quad a_2 = S_1 - nA_1 - nF_1; \\ b_1 &= C_2 - 2,8S_2 \cdot \text{КН} - 1,65A_2 - 0,35F_2; \quad b_2 = S_2 - nA_2 - nF_2; \\ c_1 &= 2,8S_3 \cdot \text{КН} + 1,65A_3 + 0,35F_3 - C_3; \quad c_2 = nA_3 + nF_3 - S_3. \end{aligned}$$

Подставляя эти сокращенные обозначения в линейные уравнения, получим:

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y &= c_1; \\ a_2x + b_2y &= c_2. \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений дает возможность определить значения x и y :

$$x = \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1}; \quad y = \frac{a_1c_2 - a_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1}.$$

2. Пример расчета трехкомпонентной сырьевой смеси

Химический состав исходных сырьевых материалов, пересчитанный на 100 %, представлен в таблице 1:

Таблица 1

Компоненты	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	П.п.п.	Сумма
Известняк	0,69	1,15	0,52	54,15	0,49	0,12	12,88	100,0
Глина	73,79	14,98	3,65	2,71	1,75	0,29	2,83	100,0
Пиритные огарки	13,94	1,44	78,40	2,10	0,22	3,10	0,80	100,0

Задаемся значениями $\text{КН} = 0,9$ и $n = 2,3$.

Определяем значения коэффициентов:

$$a_1 = 54,15 - 2,8 \cdot 0,69 \cdot 0,9 - 1,65 \cdot 1,15 - 0,35 \cdot 0,52 = 50,33;$$

$$b_1 = 2,71 - 2,8 \cdot 73,79 \cdot 0,9 - 1,65 \cdot 14,98 - 0,35 \cdot 3,65 = -209,24;$$

$$c_1 = 2,8 \cdot 13,94 \cdot 0,9 + 1,65 \cdot 1,44 + 0,35 \cdot 78,40 - 2,10 = 62,85;$$

$$a_2 = 0,69 - 2,3 \cdot 1,15 - 2,3 \cdot 0,52 = -3,16;$$

$$b_2 = 73,79 - 2,3 \cdot 14,98 - 2,3 \cdot 3,65 = 30,94;$$

$$c_2 = 2,3 \cdot 1,44 + 2,3 \cdot 78,40 - 13,94 = 169,69.$$

Определяем соотношение между компонентами:

$$x = \frac{62,85 \cdot 30,94 - 169,69(-209,24)}{50,33 \cdot 30,94 - (-3,16)(-209,24)} = 41,80;$$

$$y = \frac{50,33 \cdot 169,69 - (3,16) \cdot 62,85}{50,33 \cdot 30,94 - (-3,16)(-209,24)} = 9,75.$$

Следовательно, в сырьевой смеси на 1 в.ч. огарков приходится 41,80 в.ч. известняка и 9,75 в.ч. глины. В процентном количестве это составит:

$$\text{Известняк} = \frac{41,80 \cdot 100}{41,80 + 9,75 + 1} = 79,54\%;$$

$$\text{Глина} = \frac{9,75 \cdot 100}{41,80 + 9,75 + 1} = 18,55\%;$$

$$\text{Огарки} = \frac{1 \cdot 100}{41,80 + 9,75 + 1} = 1,91\%.$$

Подсчет химического состава сырьевой смеси и клинкера представлен в таблице 2:

Таблица 2

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	П.п.п.	Сумма
Изн. – 79,54 %	0,55	0,91	0,41	43,07	0,39	0,10	34,11	79,54
Глина – 18,55 %	13,69	2,78	0,68	0,50	0,32	0,05	0,53	18,55
Огарки – 1,91 %	0,26	0,03	1,50	0,04	0,01	0,06	0,01	1,91
Сырьевая смесь	14,50	3,72	2,59	43,61	0,72	0,21	34,65	100,00
Клинкер k=1,5304	22,21	5,69	3,96	66,74	1,09	0,31	-	100,00

Определяем значения КН и модулей:

$$\text{КН} = \frac{66,74 - 1,65 \cdot 5,69 - 0,35 \cdot 3,96}{2,8 \cdot 22,21} = 0,90;$$

$$n = \frac{22,21}{5,69 + 3,96} = 2,30;$$

$$p = \frac{5,69}{3,96} = 1,44.$$

Совпадение заданных и расчетных значений КН и *n* свидетельствует о правильности проведенного расчета.

3. Расчетный минералогический состав клинкера

Производим пересчет химического состава клинкера при условии, что сумма $C + A + F + S = 100\%$.

Пересчетный коэффициент

$$k_1 = \frac{100}{100 - (\text{MgO} + \text{SO}_3)} = \frac{100}{98,6} = 1,0142$$

$$\text{CaO} = 66,74 \cdot 1,0142 = 67,68 \%$$

$$\text{SiO}_2 = 22,21 \cdot 1,0142 = 22,52 \%$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,69 \cdot 1,0142 = 5,77 \%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3,96 \cdot 1,0142 = 4,02 \%$$

Содержание минералов в клинкере определяется по формулам:

$$C_3S = 4,07C - 7,6S - 6,72A - 1,42F =$$

$$= 4,07 \cdot 67,68 - 7,6 \cdot 22,52 - 6,72 \cdot 5,77 - 1,42 \cdot 4,02 = 59,82 \%$$

$$C_2S = 8,6S + 5,07A + 1,07F - 3,07C =$$

$$= 8,6 \cdot 22,52 + 5,07 \cdot 5,77 + 1,07 \cdot 4,02 - 3,07 \cdot 67,6 = 19,45 \%$$

$$C_3A = 2,65A - 1,70F = 2,65 \cdot 5,77 - 1,7 \cdot 4,02 = 8,46 \%$$

$$C_4AF = 3,04F = 3,04 \cdot 4,02 = 12,22 \%$$

4. Количество жидкой фазы, образующейся при обжиге клинкера

Расчет производится по формуле:

$$L = 1,12C_3A + 1,35C_4AF + \text{MgO} + \text{SO}_3 =$$

$$= 1,12 \cdot 8,46 + 1,35 \cdot 12,22 + 1,09 + 0,31 = 28,62 \%$$

Примечание: при наличии компьютерной программы для расчета сырьевой смеси необходимо рассчитать сырьевые смеси при переменных значениях КН и модулей и выявить взаимосвязь между основными характеристиками клинкеров.

Лабораторная работа 2. Приготовление сырьевой смеси для получения клинкера

Цель работы: используя данные расчета компонентного состава сырьевой смеси, приготовить сырьевую смесь, обеспечивающую получение клинкера с расчетными характеристиками.

Методика выполнения работы

Сырьевая смесь в количестве 500–1000 г готовится из предварительно измельченных до $S_{уд} \approx 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ и высушенных сырьевых компонентов. Известняк, глина и корректирующая добавка отвешиваются на технических весах в необходимом количестве с точностью до 0,01 г, после чего объединяются и тщательно перемешиваются в фарфоровой ступке, либо в лабораторной шаровой мельнице в течение 30 минут. После перемешивания сырьевая смесь пересыпается в пластиковые бутылки с пробками и помещается на хранение. В дальнейшем приготовленная сырьевая смесь используется для определения ее важнейших технологических характеристик и получения портландцементного клинкера.

Примечание: приготовленная сырьевая смесь подвергается термическому анализу (ТГ И ДТА анализы)

Лабораторная работа 3. Определение влажности сырьевого шлама

Цель работы: освоить методику определения влажности шлама.

Общие положения

Для цементных заводов, работающих по мокрому способу производства, большое значение имеет влажность сырьевого шлама, которая должна обеспечивать необходимые значения текучести или реологических свойств. Абсолютная влажность шламов на разных заводах предопределяется физико-химическими свойствами используемого сырья и составляет 30–45 % при среднегодовом отклонении от оптимального значения $\pm 2 \%$.

При недостаточном количестве воды, сырьевой шлам будет малоподвижным (низкая текучесть, большая вязкость), что потребует увеличения расхода воздуха и механической энергии на его перемешивание в шламобассейнах, транспортировку с помощью шламовых насосов по трубопроводам во вращающуюся печь. Избыток воды в шламе приводит к увеличению удельного расхода топлива на его сушку. Установлено, что снижение влажности шлама на 1 % приводит к уменьшению удельного расхода топлива на обжиг также на 1 %.

Центральная заводская лаборатория или лаборатория сырьевого цеха осуществляют оперативный технологический контроль за влажностью шлама путем отбора не реже 1 раза в час проб шлама из течек мельниц, шламобассейна и шламового питателя печи. По результатам

этих анализов производится оперативная корректировка влажности шлама в соответствии со значением, предусмотренным технологической картой.

Методика выполнения работы

5–10 г навески сырьевой смеси помещается в фарфоровую чашку, куда с помощью бюретки и при постоянном перемешивании приливается до 2–4 мл воды. Полученный шлам переносится в предварительно высушенный и взвешенный стеклянный бюкс емкостью не меньше 50 мл, бюкс закрывают крышкой и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0002 г. После взвешивания бюкс с навеской шлама и со снятой крышкой помещается в сушильный шкаф, где его выдерживают при температуре 105–110 °С в течение 2–3 часов, затем накрывают крышкой и переносят из сушильного шкафа для охлаждения в эксикатор с решеткой, на дно которого насыпают хлористый кальций.

После остывания бюкс с закрытой крышкой взвешивается, результат записывается и вновь с открытой крышкой помещается в сушильный шкаф на 30 минут. Операции взвешивания и сушки повторяются до достижения бюксом с навеской постоянного веса.

Влажность шлама определяется по формулам:

$$W_0 = \frac{(g_1 - g_2) \cdot 100}{g_1 - g_0}, \quad W_A = \frac{(g_1 - g_2) \cdot 100}{g_2 - g_0},$$

где W_0 – относительная влажность шлама, %;

W_A – абсолютная влажность шлама, %;

g_0 – вес пустого сухого бюкса, г;

g_1 – вес бюкса с навеской влажного шлама, г;

g_2 – вес бюкса со шламом, высушенным до постоянного веса, г.

Относительная влажность характеризует процентное содержание влаги в пересчете на абсолютно сухой шлам.

Взаимосвязь между этими влажностями можно выразить с помощью формул:

$$W_0 = \frac{W_A \cdot 100}{100 + W_A} \%, \quad W_A = \frac{W_0 \cdot 100}{100 + W_0} \%.$$

После выполнения работы по полученным результатам делаются необходимые **выводы**.

Лабораторная работа 4. Определение тонкости помола сырьевой смеси

Цель работы: определить частные остатки на контрольных ситах № 02 и №008 для приготовленной сырьевой смеси и сделать выводы об ее технологических свойствах.

Общие положения

Тонкость помола сырьевой смеси определяют в заводской лаборатории одновременно с влажностью шлама в пробах, отобранных из мельниц, шламбассейнов и шламовых питателей.

Тонкость помола сырьевой смеси оказывает большое влияние не только на ее реакционную способность в процессе обжига, но и на свойства сырьевой муки или шлама. При очень тонком помоле увеличивается удельный расход электроэнергии на помол, снижается производительность мельниц и увеличивается износ их бронифутеровки и мелющих тел, уменьшается текучесть (подвижность) шлама, возникает необходимость увеличивать его влажность, что приводит к уменьшению производительности печей и увеличению расхода топлива.

При грубом помоле ухудшаются структурно-механические и реологические свойства шлама, снижается его устойчивость, что приводит к расслоению шлама и повышению его неоднородности, увеличивается абразивный износ трубопроводов, шламовых насосов и другого технологического оборудования. У грубодисперсных смесей уменьшается реакционная способность вследствие заметного снижения усвоения в смеси оксида кальция, что приводит к недожогу смеси и получению клинкера с повышенным содержанием свободного оксида кальция. Поэтому тонкость помола сырьевой смеси является важнейшим технологическим параметром, тщательно контролируемым на каждом цементном заводе.

Методика выполнения работы

В фарфоровой чашке приготавливается 90–100 г шлама с известной влажностью, после чего переносится в стеклянный стакан и взвешивается на технических весах с точностью до 0,1 г. Масса навески влажного шлама определяется по разности.

При выполнении работы используются стандартные контрольные сита №02 (размер отверстий в свету 0,2 мм) и № 008 (размер отверстий в свету 0,08мм). Набор сит собирается таким образом, чтобы сито № 02 располагалось над ситом № 008. С помощью чистой ложечки шлам из стакана переносится небольшими порциями на верхнее сито, на которое одновременно подается вода из колбы-промывалки или из

водопроводного крана. При этом необходимо следить за тем, чтобы вода не переполняла верхнее сито и не разбрызгивалась поверх сита. Аналогичные меры предосторожности необходимо соблюдать и при прохождении воды через нижнее сито. Для ускорения прохождения воды и частиц шлама через сито можно применять мягкую кисточку для взмучивания шлама. После промывания основной порции шлама в верхнее сито переносится остаток шлама из стакана путем тщательного смыва его со стенок стакана и с ложки струей воды. Далее остаток на сите № 02 тщательно промывается водой над ситом № 008, остаток на котором также тщательно промывается. Процесс отделения фракций можно считать законченным, если через сито проходит чистая, незамутненная вода.

Сита с оставшимися на них фракциями частиц помещаются в сушильный шкаф и высушиваются при температуре 100–110 °С в течение 1,5 часов. После сушки и охлаждения каждая фракция частиц с помощью мягкой кисточки и легкого постукивания сит о жесткую поверхность переносится на отдельные кальки и взвешиваются на технических весах с точностью 0,01 г.

Расчет частных остатков на ситах выражается в процентах на сухое вещество и производится по формуле:

$$R = \frac{P_1 \cdot 100}{P_0(100 - W_A)} \cdot 100,$$

где R – содержание частного остатка на сите № 02 или № 008, %;

P_1 – масса сухого остатка на сите, г;

P_0 – масса навески влажного шлама, г;

W_A – абсолютная влажность шлама, %.

Допустимые значения $R_{02} < 2$ %; $R_{008} = 8 - 14$ %.

Выводы по лабораторной работе

На основе полученных результатов прогнозируются реологические свойства шлама и реакционная способность сырьевой смеси.

Лабораторная работа 5. Определение удельной поверхности сырьевой смеси

Цель работы: определить удельную поверхность сырьевой смеси и рассчитать среднеповерхностный размер частиц.

Общие положения

Удельная поверхность является характеристикой дисперсности цементной сырьевой смеси и является, наряду с гранулометрическим составом и остатками на ситах №02 и №008, важнейшим технологическим параметром, используемым при контроле процесса её помола.

Методика выполнения работы изложена в лабораторной работе (см. *методическое пособие для бакалавриата «Портландцемент»*).

После определения удельной поверхности цементной сырьевой смеси необходимо дать прогноз о её реакционной способности и поведении при обжиге.

Лабораторная работа 6. Определение титра сырьевой смеси

Цель работы: определить титр сырьевой смеси для получения портландцементного клинкера и сделать выводы о технологических свойствах исследуемой смеси.

Необходимые реактивы и растворы: 1н титрованный раствор соляной кислоты, 0,25н титрованный раствор гидроксида натрия, 0,2 % раствор фенолфталеина.

Общие положения

Основные характеристики ПЩ клинкера предопределяются, прежде всего, химическим составом сырьевой смеси, поступающей на обжиг и, в частности, содержанием оксида кальция. Определение содержания CaO обычными методами химического анализа требует достаточно много времени, поэтому в практике работы многих заводских лабораторий используется один из ускоренных методов определения содержания CaO по *титру*.

Титр сырьевой смеси – это процентное содержание в смеси суммы $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$, являющееся важнейшим параметром оперативного технологического контроля за качеством сырьевой смеси и содержанием в ней карбонатного компонента.

При однородном химическом составе исходных сырьевых компонентов можно достаточно просто приготовить сырьевую смесь с заданным химическим составом, используя для этой цели заранее приготовленные смеси с высоким и низким титром.

Помимо определения титра сырьевой смеси, производимого лабораторией сырьевого цеха, ЦЗЛ через каждые два часа делает

химический анализ смеси на содержание четырех основных оксидов и 1–2 раза в смену проводит полный химический анализ.

Метод определения содержания CaO по титру неприменим в случаях, когда сырье содержит повышенное количество MgCO₃ или когда в качестве сырьевых компонентов используется нефелиновый шлак, доменный шлак и основные топливные золы, т.к. в них оксид кальция в значительной степени связан в силикаты кальция.

Оптимальное значение титра сырьевой смеси на различных заводах колеблется в пределах 75–79 %.

Методика выполнения работы

Определение титра сырьевой смеси основано на разложении CaCO₃ соляной кислотой. При обработке навески смеси избыточным количеством соляной кислоты и оттитровании непрореагировавшей кислоты щелочью, определяют процентное содержание карбонатов в смеси.

Сырьевая смесь (~ 3 г) помещается в фарфоровую чашку и высушивается на песчаной бане. Сушка считается законченной, когда холодное стекло, поднесенное к чашке с материалом, не запотекает от конденсирующейся влаги. Высушенный материал измельчается в фарфоровой ступке и на аналитических весах берется навеска 1 г и высыпается в коническую колбу емкостью 250 мл, в которую предварительно наливается 10 мл дистиллированной воды. После этого в колбу приливается 20 мл 1 н титрованного раствора соляной кислоты и еще 30 мл дистиллированной воды, смесь нагревается до кипения со вставленной в горло колбы воронкой и кипятится еще 5 минут (не бурно). Далее воронка и горлышко колбы промывается 60 мл горячей воды, прибавляется 3–4 капли фенолфталеина и избыток кислоты оттитровывается из бюретки 0,25 н раствором NaOH до появления розовой окраски.

Расчет титра производится по формуле:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{(V_{\text{HCl}} - V_{\text{NaOH}}/4) \cdot T_{\text{CaCO}_3} \cdot 100}{P},$$

где V_{HCl} – объем HCl, прилитой к смеси, мл; $V_{\text{HCl}} = 20$ мл;

V_{NaOH} – объем 0,25 н раствора NaOH, пошедшей на титрование избытка HCl, мл;

1/4 – коэффициент, выражающий соотношение между концентрациями растворов NaOH и HCl;

T_{CaCO_3} – титр 1 н раствора HCl, выраженный в граммах CaCO₃;

$$T_{\text{CaCO}_3} = 0,05 \text{ г CaCO}_3 ;$$

P – навеска смеси, г.

При $P = 1$ г, формулу можно представить в виде:

$$\% \text{CaCO}_3 = (20 - V_{\text{NaOH}}/4) \cdot 0,05 \cdot 100.$$

Выводы по лабораторной работе

По результатам определения титра производится сравнение расчетного и фактического содержания карбонатов в сырьевой смеси и прогнозируются ее технологические свойства.

Лабораторная работа 7. Определение текучести сырьевого шлама

Цель работы: исследовать влияние влажности на текучесть шлама и определить оптимальное значение влажности.

Общие положения

Текучесть шлама является обратной величиной его вязкости и широко используется на цементных заводах, работающих по мокрому способу, в качестве важнейшего технологического параметра, по которому производится контроль процесса приготовления шлама. Необходимый уровень текучести шлама достигается при оптимальной влажности, которая колеблется в пределах 30–45 % и зависит, прежде всего, от природы и физико-химических свойств глинистого и карбонатного компонентов. Кроме того, на текучесть шлама большое влияние оказывают дисперсность твердой фазы, температура шлама, соотношение компонентов сырьевой смеси, наличие различных добавок. Шлам является типичным объектом коллоидной химии, которая располагает теорией и практикой стабилизации суспензий и рекомендует использовать для регулирования текучести сырьевых шламов химические добавки двух видов: добавки-электролиты и поверхностно-активные вещества. Эффективность первых обусловлена их действием на двойной электрический слой, образующийся вокруг частиц. Электролиты уменьшают размер этого слоя, уплотняя его и высвобождая частично воду, в результате чего увеличивается количество свободной воды, ослабляющей молекулярные силы притяжения между частицами.

Действие ПАВ объясняется тем, что их молекулы адсорбируются на поверхности частиц полярным концом, а углеводородным радикалом обращены в жидкость, в результате чего вокруг частиц образуются «масляные» оболочки, ослабляющие силы взаимодействия частиц, что

увеличивает не только их взаимную подвижность, но и подвижность всей системы в целом.

Расчет количества воды для получения шлама с заданной влажностью

Абсолютная влажность шлама характеризует количество воды, приходящееся на 100 г сухого материала. Для приготовления шлама с начальной влажностью, например, 40 %, к 50 г сухого шлама необходимо прилить 20 мл воды. Для приготовления шлама с влажностью 42 % к шламу с 40 % влажности необходимо прилить воды в количестве:

$$B = \frac{W_2 \cdot P}{100} - \frac{W_1 \cdot P}{100} = \frac{(W_2 - W_1) \cdot P}{100} = \frac{(42 - 40) \cdot 50}{100} = 1 \text{ мл},$$

где P – навеска сухого шлама, г;

W_1, W_2 – соответственно абсолютная влажность шлама в начальном и конечном состоянии, %.

Выводы по лабораторной работе

На основе полученных значений текучести шлама делаются выводы о его технологических свойствах.

Лабораторная работа 8. Определение структурно-механических характеристик сырьевого шлама

Общие сведения

Сырьевые шламы представляют собой суспензию, состоящую из карбонатного, глинистого компонентов и воды. На одну часть карбонатного компонента приходится от 3-х до 4-х частей глинистого, при влажности суспензии 30–45 %. Сырьевые шламы относятся к полидисперсным системам, содержащим частицы размером от 3 до 200 мкм, с преобладающим содержанием (50–70 %) частиц размером 3–10 мкм.

Двухфазные дисперсные системы (Т+Ж) с высокой концентрацией и дисперсностью частиц твердой фазы способны образовывать устойчивые структуры, обладающие определенными механическими свойствами – прочностью, упругостью, пластичностью, вязкостью. Совокупность этих свойств, характеризующих образовавшуюся структуру, называют структурно-механическими свойствами и используют их при инструментальном контроле технологических свойств шламов, суспензий, паст и других влажных дисперсных систем.

Наиболее широкое распространение для оценки упруго-вязких (реологических) свойств дисперсных систем получили вязкость и предельное напряжение сдвига. Вязкость характеризует величину сил трения, которые возникают при перемещении одного слоя жидкости относительно другого и численно равна силе, которую нужно приложить к системе, чтобы обеспечить определенную разность скоростей двух параллельных слоев жидкости, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии. Величина, обратная вязкости, называется текучестью.

Отношение силы к площади, к которой она приложена, называется давлением. Под действием давления в объекте его приложения возникают напряжения, численно равные приложенному давлению. Эти напряжения вызывают в материалах деформации растяжения, сжатия или сдвига. Растяжение или сжатие происходит под действием нормальных напряжений, а сдвига – под действием касательных или тангенциальных. Наиболее полную характеристику структурированных систем дает исследование деформации сдвига. Различают два вида предельных напряжений сдвига: статическое и динамическое.

Предельное статическое напряжение сдвига – это напряжение, при котором начинают разрушаться структурные связи в системе и появляются признаки относительного перемещения ее структурных элементов.

Предельное динамическое напряжение сдвига – это напряжение, при котором происходит практически полное разрушение структуры системы.

Методика выполнения работы

Для определения структурно-механических свойств сырьевых шламов широко используются вискозиметры РВ-8 системы профессора М.П. Воляровича. Вискозиметр состоит из внутреннего вращающегося цилиндра (ротора) ($r = 1,6$ см) и внешнего неподвижного цилиндра (статора) ($r = 1,9$ см), имеющих между собой зазор кольцевой формы с размером 0,3 см. Ротор приводится во вращение посредством системы, состоящей из вала, шкива ($R = 2,23$ см), нити, блоков и груза. Для прекращения вращения применяют тормоз. Вращающийся цилиндр имеет на поверхности деления, по которым контролируют глубину его погружения в шлам.

Сырьевой шлам в количестве 30 см³ (в этом случае глубина погружения ротора в шлам составляет 7 см) заливают в тщательно вымытый и сухой внешний стакан, который вставляют в прорезь крышки и укрепляют его поворотом слева направо. После этого снова снимают

нагруженный цилиндр, для того, чтобы по шкале внутреннего цилиндра точно определить глубину его погружения в шлам. Вновь закрепляют стакан и на обе чашки кладут минимальный одинаковый груз (например, по 1 г), закрепляют втулку шкива при помощи тормоза и наматывают нить, вращая шкив по часовой стрелке. Следят за тем, чтобы витки ложились по возможности параллельно друг другу.

Устанавливают стрелку вблизи какого-либо деления на лимбе и, опустив тормоз, приводят внутренний цилиндр во вращение, фиксируя время, в течение которого цилиндр совершит 4–6 оборотов. После окончания измерений закрепляют тормоз и наматывают нить. Измерение при каждой нагрузке проводят не менее трех раз. Опыты повторяют при постепенном увеличении груза на 2 г до тех пор, пока удастся достаточно точно фиксировать время целого числа оборотов. После окончания измерений снимают стакан, удаляют из него шлам, промывают водой, с ротора шлам удаляют влажной тряпкой, после чего оба цилиндра насухо протираются и оставляют прибор в собранном виде.

Обработка результатов измерений

После усреднения полученных данных и расчета угловой скорости строится график зависимости скорости вращения N (об/с) от приложенной нагрузки P (г) (рис. 1.).

Условный статический предел текучести $Q_{ст}$ рассчитывается по формуле:

$$Q_{ст} = K(P_1 - P_0) \text{ дин/см}^2; 1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}.$$

Условный динамический предел текучести Q_d рассчитывается по формуле:

$$Q_d = K(P_3 - P_0) \text{ дин/см}^2.$$

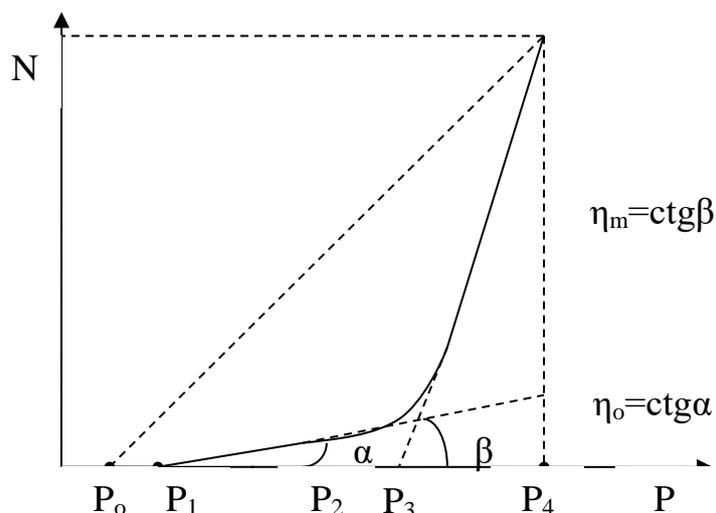


Рис. 1. Схема для расчета основных показателей структурно-механических свойств сырьевого шлама P_0 – нагрузка, преодолевающая силу трения в подшипниках, г; P_1 – условный статический предел текучести, г; P_2 – условная граница практически неразрушенной структуры, г; P_3 – условный динамический предел текучести, г; P_4 – условная граница предельно разрушенной структуры, г; η_0 – условная вязкость неразрушенной структуры; η_m – условная вязкость предельно разрушенной структуры

Значение константы прибора K определяется по формуле:

$$K = \frac{R \cdot g}{2\pi r_1^2 h + \pi r_1^3 / 2}$$

где R – радиус шкива прибора, см; $R = 2,23$ см;

g – ускорение свободного падения, см/с², $g = 981$ см/с²;

r_1 – радиус внутреннего цилиндра, см; $r_1 = 1,6$ см;

h – глубина погружения внутреннего цилиндра в шлам, см.

После подстановки цифровых значений в формулу, получим:

$$K = \frac{2187,63}{16,07h + 6,43}$$

Условная вязкость неразрушенной структуры определяется по формуле:

$$\eta_0 = \text{ctg} \alpha = \frac{K_1(P_2 - P_1)}{N_2} \text{ пз; } 1 \text{ пз (пуаз)} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Условная вязкость предельно разрушенной структуры определяется по формуле:

$$\eta_m = \operatorname{ctg} \beta = \frac{K_1(P_4 - P_3)}{N_4} \text{ пз.}$$

Значение константы прибора K_1 определяется по формуле:

$$K_1 = \frac{R \cdot g}{8\pi^2 \left(\frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot h}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^3 \cdot r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} \right)},$$

где r_2 – радиус внешнего цилиндра, см.

Подставляя цифровые значения в эту формулу, получим:

$$K_1 = \frac{2187.63}{694h + 802}.$$

По найденным значениям пределов текучести и вязкости можно определить пластичность шлама по Воларовичу, характеризующую способность структур к восстановлению в процессе деформации.

Статическая пластичность шлама:

$$П_c = \frac{Q_{\text{ст}}}{\eta_0}, \text{ с}^{-1}$$

Динамическая пластичность:

$$П_d = \frac{Q_d}{\eta_m}, \text{ с}^{-1}.$$

Чем меньшими значениями $П_c$ и, особенно, $П_d$ будет обладать шлам, тем выше будет его устойчивость и текучесть.

Выводы по лабораторной работе

Оценить полученные значения структурно-механических свойств шлама и какие меры необходимо предпринять для регулирования его свойств.

Лабораторная работа 9. Обжиг сырьевой смеси и получение портландцементного клинкера

Цель работы: обжечь сырьевую смесь по заданному температурному режиму с максимальной температурой обжига 1450 °С.

Общие положения

Обжиг сырьевой смеси является важнейшей технологической стадией при производстве цемента. При термическом воздействии в сырьевой смеси происходит разложение глинистого и карбонатного компонентов, протекают реакции образования минералов клинкера в твердой фазе, а при появлении расплава, т.е. в присутствии жидкой фазы, образуется основной клинкерный минерал – трехкальциевый силикат. В результате обжига образуется качественно новый продукт – клинкер, качество которого зависит от полноты усвоения сырьевой смесью свободного оксида кальция и минерального состава.

Методика выполнения работы

Сухая сырьевая смесь в количестве 200–300 г увлажняется водой до 8–10 % и тщательно перемешивается. Из увлажненной смеси с помощью пресс-формы и гидравлического пресса изготавливаются брикеты цилиндрической или кубической формы. Изготовленные брикеты помещаются в капсулы, изготовленные из высокоогнеупорных материалов – корунда, алунда, хромомagnesита. Для исключения возможного прилипания брикетов на дно капсулы предварительно насыпается монослоем хромомagnesитовая крошка с размером частиц 3–5 мм и на этот слой аккуратно устанавливаются брикеты с зазором между собой не менее 5 мм.

Капсуль с образцами желательно накрыть крышкой или пластинкой из огнеупорного материала, после чего он помещается в лабораторную печь с силитовыми нагревателями. При отсутствии капсул можно использовать корундовые тигли или плоские пластины из шамота или хромомagnesита толщиной 10–30 мм с обязательной подсыпкой хромомagnesитовой крошки. Режим нагрева определяется преподавателем, при этом время изотермической выдержки при температуре 1450 °С должно быть не менее 3–60 минут.

Температура в печи контролируется платино-платинородиевой термопарой. После изотермической выдержки капсулы или тигли с образцами извлекаются из печи с целью быстрого охлаждения клинкера от температуры 1300 °С для предотвращения распада C_3S и модификационного перехода $\beta - C_2S \rightarrow \gamma - C_2S$.

После остывания образцов клинкера проводится описание их внешнего вида: плотности спека, степени сохранности первоначальной формы, наличия оплавленных участков, вида и количества трещин, степени рассыпаемости (если наблюдается), характера окраски и ее однородности.

Полученный клинкер, упакованный в полиэтиленовый пакет, хранится в эксикаторе и используется для дальнейших исследований.

Лабораторная работа 10. Микроскопическое исследование структуры клинкера

Цель работы: ознакомиться с методикой изготовления аншлифов, дать общее описание микроструктуры клинкера и определить приблизительно содержание алита, белита и промежуточного вещества.

Общие положения

Микроскопический метод анализа, проводимый в лаборатории цементного завода, является одним из наиболее точных и оперативных методов контроля процесса получения клинкера и позволяет дать визуальную оценку характера образующей его микроструктуры. Этот метод анализа позволяет через 5–10 минут после изготовления шлифов установить причины нарушения технологического процесса.

Методика выполнения работы

Отбираются образцы клинкера, имеющие плоскую исходную поверхность или поверхность излома и шлифуются на абразивном круге или наждачной шкурке до получения плоской поверхности. Затем берется стеклянная пластина размером 15x15 см или 20x20 см и на поверхность этой пластины наносится небольшое количество эльборовской или алмазной пасты. Предварительно отшлифованной поверхностью образец приводится в соприкосновение с пастой на стекле и, вручную, совершая круговые движения диаметром 3–6 см, производится дальнейшая шлифовка образца. После получения качественной гладкой поверхности шлифование продолжают на листе плотного ватмана с нанесенной шлифовальной пастой. Лист ватмана должен также находиться на стеклянной подложке или другой плоской поверхности. При совершении круговых движений с прижимом образца к шлифовальной поверхности происходит постепенное погружение абразивных частиц вглубь бумаги и при этом происходит как бы автоматическое уменьшение размера абразивных частиц пасты, что позволяет достичь достаточно высокой чистоты обработки поверхности. Полировку поверхности аншлифа до зеркального блеска можно проводить на чистом листе ватмана, либо на куске фетровой ткани с использованием в качестве абразивного материала оксида хрома или пасты ГОИ.

В случае если на поверхности аншлифа под микроскопом наблюдается сетка царапин или недостаточное качество полировки, то процесс полировки продолжают на куске фетровой ткани с оксидом хрома, а затем на куске такой же ткани без оксида хрома, в течение 10–15 мин. Приготовленный шлиф тщательно промывают в нейтральной жидкости (керосин, этиловый спирт), подсушивают на воздухе и протравливают в 0,25 % спиртовом растворе уксусной кислоты.

Исследования микроструктуры клинкера проводится в отраженном свете на металлографическом микроскопе МИМ-8. Если полированные шлифы хорошо приготовлены и протравлены, то в отраженном свете можно легко распознать все минералы клинкера. Так, обработанные в вышеназванном травителе кристаллы алита приобретают голубоватую окраску, белита – буроватую, а промежуточное вещество остается светлым. Различие минералов по окраске облегчает их идентификацию.

При исследовании аншлифов в отраженном свете хорошо просматривается кристаллическая структура клинкера и отчетливо можно наблюдать поры размером более 5 мкм.

Свободный оксид кальция наблюдается и без травления в виде округлых зерен. После травления шлифа водой свободные СаО и MgO выявляются более отчетливо.

Полированные аншлифы можно травить одним сильнодействующим травителем для выявления одной или двух интересующих фаз, но применяется и последовательное травление. Если вначале шлиф протравить дистиллированной водой, то можно выявить свободную СаО, затем, воздействуя на шлиф 10 % раствором NH_4Cl , определяют кристаллы алита и белита и, после обработки шлифа 10 % водным раствором КОН можно определить стеклофазу клинкера.

Подсчет количества минералов лучше проводить по площади с использованием сетчатого окуляр-микрометра. Вся площадь сетчатого окуляр-микрометра состоит из 400 клеток (20x20). Если на долю одного минерала приходится, например, 80 клеток, то его содержание на данном участке шлифа равно:

$$X = 80 \cdot 100 / 400 = 20 \% .$$

Подобным образом вычисляется содержание других минералов. Вычислив процентное содержание каждого минерала на всех участках шлифа, подвергнутых просчету, находят среднее значение искомой величины.

Общая структура шлифа должна быть описана и зарисована с указанием размеров кристаллов, характера их распределения по плоскости шлифа.

При описании исследуемого шлифа необходимо отметить следующие характеристики:

- 1) четкая или нечеткая кристаллизация минералов;
- 2) равномернозернистость структуры;
- 3) равномерность распределения кристаллов алита, белита и промежуточного вещества по площади клинкера;
- 4) фиксируется ли наличие свободного СаО;
- 5) характеристика кристаллов алита, форма и размер кристаллов, количество алита;
- 6) характеристика кристаллов белита, форма и размер кристаллов, количество белита;
- 7) характеристика промежуточного вещества, его количество в клинкере.

Выводы по лабораторной работе

Дается оценка свойств полученного клинкера.

Лабораторная работа 11. Рентгенофазовый анализ клинкера

Цель работы: провести рентгеновскую съемку клинкера, получить рентгенограмму и расшифровать ее.

Общие сведения

Рентгенофазовый анализ является универсальным и наиболее совершенным методом исследования различных по природе материалов, позволяющий определить не только качественный и количественный состав, но и определить строение кристаллической решетки индивидуальных минералов и соединений. Кристаллы каждого химического соединения дают сугубо индивидуальную рентгенограмму с характерными значениями межплоскостных расстояний и определенной интенсивностью соответствующих отражений. Это обстоятельство лежит в основе фазового анализа технических продуктов. Качественный фазовый анализ проводится путем сравнения дифракционных отражений и их интенсивности исследуемого вещества с табличными данными. Идентификация фазы считается достаточно надежной, если на рентгенограмме имеется не менее трех наиболее интенсивных дифракционных отражений этой фазы. Это особенно важно иметь в виду при расшифровке рентгенограмм смеси минералов, когда возможно совпадение ряда отражений.

Методика выполнения работы

Рентгеновский анализ выполняется на установке ДРОН-3М. Исследуемый клинкер усредняется, и от него отбирается проба в количестве 20–25 г, которая измельчается в металлической ступке в мелкую крупку. После усреднения крупки от нее отбирается 5–7 г материала, который измельчается в агатовой ступке с периодическим отсевом на сите № 006 при помощи мягкой кисточки. Непросеянный остаток на сите вновь растирается и просеивается до полного прохождения исходной пробы материала. Тонкодисперсный порошок клинкера (< 60 мкм) необходимо хранить до анализа в пробирке, закрытой резиновой или корковой пробкой.

Проба исследуемого вещества слегка смачивается глицерином и набивается в кювету, изготовленную из кварцевого стекла и имеющую диаметр 20–25 мм с углублением на одной из плоскостей до 3 мм. Набивка проводится постепенно, слоями, до полного заполнения углубления в кювете, после чего поверхность исследуемого материала тщательно выравнивается так, чтобы плоскости материала и буртика кольца кюветы совпадали.

Заполненная материалом кювета устанавливается в держатель образца гониометра, где производится облучение материала рентгеновскими лучами с определенной длиной волны при переменном угле падения. Отраженное материалом излучение фиксируется ионизационной камерой, полученный импульс преобразуется в сигнал с определенным напряжением, регистрируемым самопишущим потенциометром. Полученная в результате съемки рентгенограмма представляет собой ломаную линию с резко выделяющимися на ней пиками – дифракционными отражениями. Одновременно с записью рентгенограммы самописец автоматически наносит штриховые линии угловых координат дифракционных отражений. По угловым координатам этих отражений определяются значения межплоскостных расстояний в кристаллической решетке исследуемого материала.

Таблица 3

№ пика	2 Θ , град	Θ , град	I, мм	I ₀	d/n, Å	C ₃ S		β -C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
						d/n, Å	I ₀	d/n, Å	I ₀	d/n, Å	I ₀	d/n, Å	I ₀

$$I_0 = I/I_{\max} \cdot 100$$

Качественный рентгенофазовый анализ материала производится путем сравнения межплоскостных расстояний и интенсивности отражений на полученной рентгенограмме с табличными данными для минералов, входящих в состав клинкера. Результаты расшифровки рентгенограммы представляются в виде следующей таблицы 3.

Для расшифровки рентгенограмм также можно использовать программу Crystallographica Search-Match.

Выводы по лабораторной работе

По результатам расшифровки рентгенограммы делается вывод о фазовом составе клинкера с обязательным указанием межплоскостных расстояний наиболее интенсивных дифракционных отражений для каждого клинкерного минерала

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. – М.: Metallurgy, 1983, – 176 с.
2. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – М.: Metallurgy, 1985, – 480 с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1982, – 400 с.
4. Кайнарский И.С. Процессы технологии огнеупоров. – Л.: Metallurgy, 1969, – 300 с.
5. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980, – 320 с.
6. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1973, – 498 с.
7. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980, – 472 с.
8. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986, – 463 с.
9. Пащенко А.А., Сербин В.П., Старчевская Е.А. Вяжущие материалы. – Киев: Вища школа, 1975, – 440 с.
10. Лифанов И.С., Шерстюков Н.Г. Метрология, средства и методы контроля качества в строительстве. – М.: Стройиздат, 1979.– 233 с.
11. Попов Л.Н., Лабораторный контроль строительных материалов и изделий. Справочник – М.: Стройиздат, 1986. – 349 с.
12. Ничипоренко С.П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. – Киев: Наукова думка, 1968. – 76 с.
13. Иванов Ф.М., Крылов В.В. Физико-механические испытания цементов. – М.: Высшая школа, 1972. – 192 с.
14. Пащенко А.А., Мясников А.А. и др. Физическая химия силикатов. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.
15. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989.– 384 с.
16. Дубовская Н.С., Лотов В.А., Смирнская В.Н. Карточки для контроля усвоения знаний по курсу ХТВМ: Томск, изд. ТПУ, 1982.–25 с.
17. Хенней Н.В. Химия твердого тела.– М.: Мир, 1971.– 223 с.
18. Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Г., Ходаковская Р.Я. Практикум по технологии стекла и ситаллов.– М.: Стройиздат, 1970.– 512 с.
19. Бакунов В.С., Балкевич В.Л. и др. Практикум по технологии керамики и огнеупоров.– М.: Стройиздат, 1972.– 352 с.
20. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов.– Л.: Энергия, 1973.– 335 с.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И ПОЛУЧЕНИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу «Основы технологии вяжущих материалов» для студентов направления подготовки **магистров 18.04.01 Химическая технология**

Составители

**Лотов Василий Агафонович
Сударев Евгений Александрович
Кутугин Виктор Александрович**

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
С качеством представленного оригинал-макета

Подписано к печати 14.05.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ.л. 9,01. Уч.-изд. л. 8,16.

Заказ . Тираж 20 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Система менеджмента качества

Издательство Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru