



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШНПТ

_____ Р.В. Оствальд

«_____» _____ 2025 г.

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Методические указания к выполнению лабораторной и
самостоятельной работы по курсу

«Общая технология силикатов»

для студентов направления подготовки **бакалавров**

18.03.01 Химическая технология

Томск 2025

УДК 666.96

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Методические указания к лабораторному практикуму и самостоятельной работе студентов по курсу **«Общая технология силикатов»** для студентов направления подготовки бакалавров **18.03.01 Химическая технология**

Томск: Изд. ТПУ, 2025 - 45 с.

Составители: **к.т.н. Смиренская В.Н**
к.т.н., доцент Сударев Е.А.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром НОЦ Н.М Кижнера
«__» _____ 2025 г.

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

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ТГАСУ
В.А. Лотов

1. Лабораторная работа по теме «Портландцемент»

1.1. Общие теоретические сведения

Портландцементом называют порошкообразный (тонкодисперсный) материал, полученный совместным помолом цементного клинкера и добавки гипса.

Цемент – это основа строительной индустрии. Портландцемент М400 применяют в основном для приготовления бетонных и железобетонных монолитных конструкций, изготовления сборного железобетона; портландцемент М500 и 600 – для гидротехнических сооружений, наружных частей монолитного бетона массивных сооружений, аэродромного строительства, производства асбестоцементных и многих других изделий.

Следует различать основные строительно-технические свойства:

- цементного теста;
- цементных растворов;
- бетонных смесей;
- изделий на основе цемента.

Свойства цемента влияют как на свойства растворов и бетонных смесей, так и на свойства изделий. К важнейшим свойствам цемента относятся:

- химико-минералогический состав;
- истинная плотность;
- насыпная плотность;
- тонкость помола и гранулометрия;
- нормальная густота;
- сроки схватывания;
- равномерность изменения объема при твердении;
- прочностные характеристики и марка.

Свойства, характеризующие строительные растворы и бетонные смеси, включают подвижность, живучесть (сроки схватывания), реологические свойства (удобоукладываемость), нормальную густоту, водопотребность. Свойства изделий характеризуются прочностными характеристиками, усадкой и набуханием, водонепроницаемостью, долговечностью, трещиностойкостью и др.

Химико-минералогический состав цемента. Портландцементный клинкер обычно получают в виде спекшихся мелких и более крупных гранул и кусков размером до **10–20** или до **50–60 мм** в зависимости от типа печи.

По микроструктуре клинкер, получаемый спеканием, представляет собой сложную тонкозернистую смесь многих кристаллических фаз и небольшого количества стекловидной фазы.

Химический состав клинкера колеблется в сравнительно широких пределах. Главными оксидами цементного клинкера являются: оксид кальция CaO , двуоксид кремния SiO_2 , оксиды алюминия Al_2O_3 и железа Fe_2O_3 , суммарное содержание которых достигает обычно 95–97 %. Кроме них в состав клинкера в виде различных соединений в небольших количествах могут входить оксид магния MgO , серный ангидрид SO_3 , двуоксид титана TiO_2 , оксид хрома Cr_2O_3 , оксид марганца Mn_2O_3 , щелочи Na_2O и K_2O , фосфорный ангидрид P_2O_5 и др.

Обычно содержание этих оксидов в клинкере колеблется в следующих пределах (% , мас):

$\text{CaO} - 63-66$; $\text{SiO}_2 - 21-24$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 4-8$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2-4$;
 $\text{MgO} - 0,5-5$; $\text{SO}_3 - 0,3-1$;
 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - 0,4-1$;
 $\text{TiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 - 0,2-0,5$;
 $\text{P}_2\text{O}_5 - 0,2-0,5$.

Химический анализ клинкера проводят по методике, регламентированной ГОСТ 5382–2019. При этом *определяют* обычно общее процентное содержание оксидов кальция, как связанного, так и находящегося в свободном состоянии; кремния SiO_2 ; полуторных оксидов Fe_2O_3 и Al_2O_3 ; оксида магния MgO ; серного ангидрида SO_3 ; оксидов щелочных металлов Na_2O и K_2O , а также нерастворимого остатка и потерь при прокаливании.

Повышенное содержание **оксида кальция** (при условии обязательного его связывания в химические соединения с кислотными окислами) обуславливает обычно повышенную скорость твердения портландцемента, его высокую конечную прочность, но несколько пониженную водостойкость. Цементы с повышенным содержанием **кремнезема** в составе клинкерной части характеризуются пониженной скоростью твердения в начальные сроки при достаточно интенсивном нарастании прочности в длительные сроки; они отличаются повышенными водо- и сульфатостойкостью.

При повышенном количестве **оксида алюминия** а, следовательно, и алюминатов в составе цементов последние приобретают способность к ускоренному твердению в начальные сроки. Цемент при повышенном содержании глинозема характеризуется меньшими водостойкостью, сульфатостойкостью и морозостойкостью.

Соединения **оксида железа** способствуют снижению температуры спекания клинкера. Цементы, богатые оксидом железа, при низком содержании глинозема ведут себя аналогично высококремнеземистым. Они относительно медленно схватываясь и твердея в начальные сроки, в дальнейшем достигают высокой прочности. Цементы с повышенным количеством оксида железа отличаются высокой стойкостью по отношению к действию сульфатных вод.

Повышенное содержание в клинкере *оксида магния* вызывает неравномерность изменения объема цемента при твердении. По стандарту MgO в клинкере должно быть *не больше 5 %*.

Ангидрид серной кислоты SO_3 в виде гипса необходим для регулирования сроков схватывания портландцемента. По ГОСТу 10178–85* его содержание ограничивается пределами *1,5–3,5 %*. Более высокое содержание SO_3 может вызвать неравномерное изменение объема цемента вследствие образования гидросульфоалюмината кальция.

Двуоксид титана TiO_2 входит в клинкер с глинистым компонентом сырьевой смеси в количестве *0,1–0,5 %*. При таком его содержании он способствует лучшей кристаллизации клинкерных минералов; при содержании *2–4 % TiO_2* , замещая часть кремнезема, способствует повышению прочности цемента, а при большем содержании снижает ее.

Количество *оксида марганца Mn_2O_3* в цементном клинкере обычно не превышает *1–2 %* и существенно не влияет на физико-механические свойства цемента.

Фосфорный ангидрид P_2O_5 и оксид хрома Cr_2O_3 в небольшом количестве (*0,1–0,3 %*) оказывают легирующее действие на клинкер, увеличивая интенсивность твердения цемента в первые сроки и повышая его конечную прочность. При большем их количестве (*1–2 %*) скорость твердения цементов замедляется, а прочность снижается.

Щелочные оксиды $K_2O + Na_2O$ обычно присутствуют в клинкерах в количестве до *0,5–1 %*, причем содержание K_2O , как правило, в несколько раз больше, чем Na_2O . Если щелочей более *1 %*, то они вызывают непостоянство сроков схватывания цемента и образование выцветов на поверхности растворов или бетонов. Щелочные соединения могут явиться также причиной опасных деформаций в гидротехнических бетонах, изготовляемых на заполнителях, содержащих кремнистые сланцы, опаловидные и другие аморфные видоизменения кремнезема. Поэтому для изготовления таких бетонов рекомендуется применять цементы, содержащие *не более 0,6 %* щелочей (в пересчете на оксид натрия).

В клинкерах заводского изготовления при химическом анализе может обнаруживаться так называемый *нерастворимый (в HCl) остаток*, который состоит обычно из *кварцевых* частичек, не вступивших в реакцию с CaO во время обжига.

Прокаливанием проб цементов при *1000–1200 °C* в процессе химического анализа определяют *потери при прокаливании*. Они имеют большее практическое значение для характеристики готового портландцемента, чем клинкера, так как свидетельствуют о сроке хранения вяжущего, вызвавшем

частичную гидратацию клинкерных минералов и переход свободной CaO в Ca(OH)_2 .

Минералогический состав клинкера. В клинкере рядового состава главные оксиды образуют силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция в виде минералов кристаллической структуры, часть их входит в стекловидную фазу.

Основными минералами цементного клинкера являются:

алит $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ или C_3S и **белит** $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ или C_2S .

Алит – важнейший клинкерный минерал-силикат, определяющий высокую прочность, быстроту твердения и ряд других свойств портландцемента. В клинкере он содержится обычно в количестве **45–60 %**.

По современным данным алит рассматривают как твердый раствор трехкальциевого силиката и небольшого количества MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , C_2O_3 и др. **Истинная плотность алита** – **3150 кг/м³**. Чистый C_3S устойчив в интервале температур от 1200–1250 до 1900– 2070 °С. Ниже указанных температур C_3S разлагается на C_2S и CaO , а при температуре выше 2070°С плавится. Практическое значение имеет нижняя температурная область, так как после обжига клинкер, охлаждаясь, находится некоторое время при температуре **1200–1250 °С**, что может вызвать его разложение и, следовательно, ухудшение качества. При обычных температурах возможность его разложения резко уменьшается вследствие большего переохлаждения.

На прочность и другие свойства портландцемента значительно влияют форма кристаллов **алита** в клинкере, их размеры, распределение по величине, степень закристаллизованности и др. Петрографические исследования показали, что клинкеры, используемые для изготовления цемента **марок 600–700**, характеризуются разными размерами кристаллов алита с преимущественным содержанием мелких кристаллов величиной **3–20 мкм**. При этом важно преобладание кристаллов правильной призматической или гексагональной формы. По данным Гжимека, цементы приобретают тем большую прочность и скорость твердения, чем выше отношение длинной оси шестигранных кристаллов **алита** к короткой.

Н.А. Торопов, Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев, М.М. Сычев, С.Д. Околоков, Л.Д. Ершов и др. установили положительное влияние на прочность портландцементов малых количеств CaSO_4 , CaF_2 , P_2O_5 , TiO_2 , Cr_2O_3 , содержащихся в сырье или специально вводимых в сырьевые смеси соединений. Присутствие их в обжигаемых смесях в количестве **0,1–0,5 %** оказывает легирующее действие на **алит** и позволяет получать цементы с повышенной активностью. Механизм их действия изучен недостаточно. Можно полагать, что эти вещества в процессе обжига способствуют образованию в клинкере кристаллов **алита** с наиболее благоприятной структурой и размерами

и одновременно затрудняют возникновение, например C_3A , отличающегося пониженной прочностью.

Белит – второй основной минерал портландцементного клинкера, отличается медленным твердением, но обеспечивает достижение высокой прочности при длительном твердении портландцемента.

Белит, как и алит, представляет собой твердый раствор β -двухкальциевого силиката (β - $2CaO \cdot SiO_2$) и небольшого количества (1–3 %) таких примесей, как Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 и др. Он содержится в клинкерах обычных портландцементов в количестве 15–30 % и обозначается формулой β - C_2S (т.е. без учета примесей).

Важным свойством *белита* является его *полиморфизм*. Установлено существование четырех полиморфных форм двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$: α - C_2S , α' - C_2S , β - C_2S , γ - C_2S .

По Н.А. Торопову, имеется еще пятая модификация – β' - C_2S .

Полиморфная α -модификация устойчива в пределах температур от 2130 (температура плавления) до 1425° С, ниже которой переходит в α' -форму.

В промышленных клинкерах вследствие трудности стабилизации α - C_2S практически не обнаруживается. α' - C_2S стабилен в области 1425–830 °С (по Персу). При более низкой температуре в условиях медленного охлаждения кристаллическая решетка чистого α' - C_2S перестраивается в решетку стабильного при низких температурах γ - C_2S . При быстром охлаждении α' - C_2S переходит при 670 °С в β - C_2S , нестабильный при всех температурах и склонный к переходу в γ - C_2S особенно при 525°С и ниже.

Однако этому переходу препятствуют некоторые примеси, внедряющиеся в кристаллическую решетку β - C_2S в количестве 1–3 %. Роль примесей стабилизаторов могут выполнять Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O и K_2O , Cr_2O_3 и др.

Вместе с тем стабильность значительно возрастает и вследствие резкого охлаждения *белита* до обычных температур.

Переход β - C_2S в γ - C_2S сопровождается увеличением абсолютного объема примерно на 10 %; в результате зерна материала растрескиваются и он рассыпается в порошок, γ - C_2S при температурах до 100 °С практически не взаимодействует с водой и, следовательно, *не обладает вяжущими свойствами*. Лишь при тепловлажностной обработке при 150–200 °С в автоклавах он проявляет слабые вяжущие свойства.

Плотность β - C_2S равна 3,28, а γ - C_2S – 2,97 г/см³.

Таким образом, C_3S и β - C_2S термодинамически неустойчивы при обычных температурах, что является причиной их активности при взаимодействии с водой.

Гидравлическая активность белита зависит от строения кристаллов (их величины, плотности, наличия трещин и включений). Цементы, в которых белит представлен округлыми плотными кристаллами с зазубренными краями со средним размером **20–50 мкм**, характеризуются повышенной прочностью. Расщепление кристаллов, приводящее к развитию удельной поверхности системы, способствует повышению ее гидравлической активности.

Промежуточное вещество, расположенное между кристаллами алита и белита, включает алюмоферритную и алюминатную фазы, а также второстепенные минералы в кристаллическом виде и стекловидную фазу. Все эти фазы при высоких температурах обжига находятся в расплавленном состоянии.

Алюмоферритная фаза промежуточного вещества клинкера (называемая иногда *целитом*), как впервые показал Н.А. Торопов, представляет собой твердый раствор алюмоферритов кальция разного состава, который в свою очередь зависит от состава сырьевых смесей, условий обжига и т.п. При этом возможно образование серии твердых растворов между C_6A_2F , C_4AF , C_6AF_2 и C_2F .

В клинкерах обычных портландцементов *алюмоферритная фаза* по своему составу близка к *четырекальциевому алюмоферриту*. Поэтому C_4AF при расчетах минералогического состава цементного клинкера по химическому составу с известной условностью считают индивидуальным минералом.

Плотность C_4AF равна **3,77 г/см³**. В этой фазе часто содержится около **1 %** MgO и TiO_2 .

Алюминаты кальция могут встречаться в промежуточном веществе клинкера в виде двух соединений: *трехкальциевого алюмината* C_3A и *пятикальциевого трехалюмината* C_5A_3 , который по уточненным данным имеет состав $12CaO \cdot 7Al_2O_3$. Однако в обычных клинкерах с высоким содержанием оксида кальция в сырьевой смеси C_5A_3 обычно отсутствует.

C_3A кристаллизуется в кубической системе в виде очень мелких шестиугольников и прямоугольников. Плотность C_3A равна **3,04 г/см³**.

Клинкерное стекло обычно присутствует в промежуточном веществе в количестве **5–15 %**. Такие значительные пределы колебаний определяются условиями охлаждения клинкера после выхода его из зоны спекания в печи.

Стекло состоит преимущественно из CaO , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . В нем также присутствуют обычно MgO и *щелочи*.

Помимо этих основных составляющих в клинкере содержатся также и некоторые другие кристаллические образования и, в частности, CaO и MgO в *свободном состоянии* $CaO_{своб}$ обнаруживается в свежемобожженном клинкере в виде бесцветных изотропных зерен. $CaO_{своб}$ должно быть не больше **0,5–1 %**.

При более высоком содержании $\text{СаО}_{\text{своб}}$ снижает качество цемента и может вызвать неравномерное изменение его объема при твердении вследствие перехода в $\text{Са}(\text{ОН})_2$.

Оксид магния находится в клинкере в виде минерала периклаза; в твердом растворе в алюмоферритной фазе или в трехкальциевом силикате; в клинкерном стекле. Вредное влияние MgO при содержании **более 5 %** на равномерность изменения объема цемента проявляется в том случае, когда он присутствует в виде кристаллов периклаза размером **более 10 мкм**, медленно реагирующих с водой в уже затвердевшем цементе и дающих $\text{Mg}(\text{ОН})_2$ характеризующегося увеличенной плотностью.

Щелочи (Na_2O и K_2O) присутствуют в клинкере обычно в виде сульфатов, а также входят в алюминатную и алюмоферритную фазы.

Примечание: В.Ф. Журавлев показал наличие вяжущих свойств не только у силикатов, алюминатов и ферритов кальция, но также и у хромитов, марганатов, титанатов и др. По его данным, вяжущие свойства присущи соединениям, в которые вместо кальция входят другие элементы второй группы периодической системы Д.И. Менделеева, стоящие в четных рядах, т.е. Sr и Ba (кроме Be). Цементы, на этих соединениях, характеризуются рядом специальных свойств, ценных в практическом отношении.

Плотность и объемная плотность. Истинная плотность портландцемента без добавок в зависимости от его химико-минералогического состава составляет **3000–3200 кг/м³**. Другой технической характеристикой цемента служит его **насыпная объемная плотность**, которая в рыхлом состоянии колеблется от **900** до **1000 кг/м³**, в уплотненном – от **1400** до **1700 кг/м³**. В практике часто пользуются для расчета объема хранилищ средней цифрой – **1200 кг/м³**.

Цементы и другие вяжущие вещества, используемые при изготовлении бетонов, обычно дозируют по массе (например, кг/м³).

Цементы с пониженной плотностью оказываются более экономичными по сравнению с цементами с повышенной плотностью, так как при одинаковом расходе по массе дают более пластичные бетонные смеси с меньшей пористостью. Например, **портландцемент** с плотностью 3,15 г/см³ при его расходе в бетоне 300 кг/м³ займет в нем пустоты объемом 300/3,15 ~ 95 литров. Если же используется **шлакопортландцемент** с плотностью 2,8 г/см³, то при том же расходе он займет пустоты объемом 300/2,8 ~ 107 литров. Таким образом, **шлакопортландцемент** по данному свойству окажется эффективнее портландцемента на $(107-95)/95 = 12,7 \%$.

Цементы с повышенной плотностью используют при возведении защитных устройств от ядерных излучений. Их применяют также при тампонировании нефтяных и газовых скважин. Такие цементы получают за счет увеличения в их составе железистых фаз C_4AF и C_2F . В необходимых случаях в состав цементов

при изготовлении вводят окись бария BaO , которая реагирует с кремнеземом с образованием $2 BaO \cdot SiO_2$ (плотность - $5,4 \text{ г/см}^3$).

Шлаковые и пуццолановые портландцемента характеризуются более низкой плотностью ($2,7\text{--}2,9 \text{ г/см}^3$), чем обычный портландцемент.

Дисперсность цемента. К технологическим свойствам цемента следует отнести *тонкость помола* цемента и его *гранулометрический состав*, что предопределяется ГОСТ 10178–85* (*остаток на сите № 008* должен быть не более **15 %** для нормального (рядового) портландцемента).

Рядовой портландцемент имеет тонкость помола, характеризующуюся удельной поверхностью **300–350 $\text{м}^2/\text{кг}$** .

Увеличение тонкости помола до **400–450 $\text{м}^2/\text{кг}$** приводит к ускорению набора прочности, что используется в технологии изготовления быстротвердеющих цементов. Однако при увеличении тонкости помола возрастает водопотребность, поэтому на кривой активности цемента как функции его удельной поверхности имеется максимум. Чем выше тонкость помола цемента, тем быстрее он снижает свою активность при хранении на воздухе (более тонкий цемент имеет меньшее водоотделение).

Увеличение тонкости цемента требует повышенного количества гипса как регулятора сроков схватывания. Технологические возможности размольного оборудования позволяют выпускать цементы с удельной поверхностью, не превышающей **400–450 $\text{м}^2/\text{кг}$** .

Нормальная густота, характеризующая реологические свойства цементной пасты, – это такая консистенция цементного теста, при которой пестик Тетмайера (прибор Вика) погружается в тесто на глубину, нормированную ГОСТом 310–76*, и используется для определения рационального значения водоцементного (В/Ц) отношения.

Водопотребность цементного теста представляет собой количество воды, которое нужно для получения теста нормальной густоты. *Водопотребность* портландцементов колеблется в пределах от **24** до **28 %** (количество воды, рассчитанное в процентах от массы цемента).

Следует отметить, что иногда при приготовлении цементного теста воды добавляется больше необходимого для протекания химических реакций гидратации клинкерных минералов, в результате вводимая в тесто избыточная вода повышает пористость цементного камня, что отрицательно сказывается на его прочности. Поэтому при прочих равных условиях, чем меньше водопотребность вяжущего вещества, тем выше его качество.

Водопотребность зависит от многих факторов – *минералогического состава, тонкости помола, присутствия добавок*. Чем больше в цементе алюминатов кальция, тем она выше. Этому способствует также введение таких

материалов, как трепел, диатомит и других активных добавок осадочного происхождения, даже в малых количествах **10–15 %**. Водопотребность увеличивается с увеличением тонкости помола, содержания алюминатов, активных добавок осадочного происхождения. Водопотребность цементов можно регулировать в значительных пределах с помощью добавок *поверхностно-активных веществ (ПАВ)*. Они оказывают разжижающее действие. В качестве **ПАВ** чаще всего применяют сульфитно-спиртовую барду и сульфитно-дрожжевую бражку (а также их производные), абиеат натрия и многие другие материалы. **ПАВ** в количестве **0,1–0,3 %** вводят в цементы при помоле, причем получают так называемые пластифицированные портландцементы. Добавки можно добавлять и при изготовлении растворных и бетонных смесей.

Схватывание цементного теста – это процесс, при котором относительно подвижная смесь цемента с водой постепенно густеет с потерями цементной пастой подвижности и приобретает такую начальную прочность, при которой ее механическая переработка становится практически затруднительной и даже невозможной (в конце схватывания). Поэтому вяжущие вещества, в том числе и цементы, должны характеризоваться такими сроками схватывания, которые дают возможность готовить растворные и бетонные смеси и использовать их в деле.

Различают начало и конец схватывания цементного теста. Условно в соответствии со стандартами сроки схватывания определяют на тесте нормальной густоты при температуре **20±2 °С** по глубине погружения в него иглы прибора Вика.

Одним из наиболее важных технических свойств цемента является *быстрота схватывания*. Вяжущее тем ценнее, чем быстрее нарастает его прочность после начала схватывания и, следовательно, чем меньше разрыв во времени между его началом и концом.

Из схватившегося теста формование изделия становится затруднительным (*начало схватывания*) или невозможным (*конец схватывания*).

Сроки схватывания должны быть такими, чтобы приготовленный раствор или бетонную смесь можно было использовать по назначению, т.е. до того, как они потеряют подвижность.

До начала схватывания тесто обладает *тиксотропными свойствами*. По мере приближения к концу схватывания цементное тесто или бетонная смесь становятся все более трудно обрабатываемыми. Необходимо, чтобы смеси в это время твердели в спокойном состоянии. Однако и в этот промежуток времени (до конца схватывания) допускается иногда механическое воздействие на бетонную смесь, если только оно приводит к уплотнению и упрочнению

бетона, хотя и вызывает нарушение начальной структуры схватившегося цемента.

Сроки схватывания цементов зависят от многих факторов и подчиняются регулированию в довольно широких пределах с учетом требований, предъявляемых к вяжущим, применяемым в строительстве.

В значительной мере отражается на скорости схватывания *минералогический состав* цементов. Так, цементы с повышенным содержанием алюминатов кальция характеризуются более короткими сроками схватывания. Белитовые цементы схватываются медленнее.

Сроки схватывания цемента можно регулировать *введением различных добавок*. Важнейший регулятор скорости схватывания портландцементов – двуводный гипс, который вводится в них при помоле в количестве 3–5 % по массе или из расчета содержания серного ангидрида в вяжущем не более 3,5 % (ГОСТ 10178–85*). Клинкер, измельченный без гипса, характеризуется очень короткими сроками схватывания, препятствующими его использованию.

Чем больше алюминатов кальция и щелочных соединений в цементе, чем выше тонкость помола, тем больше гипса следует вводить в него. Оптимальное количество последнего в зависимости от свойств цемента устанавливают специальными опытами.

Необходимо отметить, что *от количества гипса* в цементе зависят не только сроки его схватывания, но и такие важнейшие свойства, как прочность, скорость твердения, усадочные деформации, морозостойкость и др. Поэтому оптимальное количество гипса в портландцементе следует устанавливать с учетом тех требований, какие предъявляют к свойствам цемента при его использовании в различных конструкциях и сооружениях.

Так, широко используют введение при помоле 3–5 % по массе двуводного гипса, который при затворении цемента водой образует гидросульфoалюминат кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), который обволакивает зерна цемента тонкой пленкой, препятствуя таким путем реакции гидратации. Резкая разница в скорости схватывания цемента с добавкой гипса и без нее до последнего времени объяснялась следующим образом.

При смешении с водой цемента, содержащего двуводный гипс, на поверхности клинкерных зерен *немедленно в виде пленок* образуется высокосульфатная форма гидросульфoалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (**эттрингит**), почти прекращающий на некоторое время взаимодействие цемента с водой.

На скорость схватывания цементов значительно влияют и такие факторы, как *водоцементное отношение* и *температура*. С увеличением В/Ц и

понижением температуры скорости схватывания и твердения уменьшаются, и наоборот.

Увеличение *тонкости помола* цемента также способствует увеличению скорости его схватывания.

При хранении цементов на складах на них воздействуют *пары воды и CO₂*, содержащиеся в воздухе. При этом на поверхности цементных частичек образуются пленки гидратных новообразований, а также карбоната кальция, способствующие замедлению реакций цемента с водой и скорости его схватывания.

По ГОСТу 10178-85* *начало схватывания* для портландцемента должно наступать *не ранее 45 мин*, а *конец схватывания* – *не позднее 12 час* от момента смешения цемента с водой.

Ложное схватывание – практически мгновенное схватывание цемента, который после перемешивания дает тесто с нормальными сроками схватывания и без потерь прочности. Причина этого явления заключается в активной гидратации обезвоженных кристаллогидратов гипса (например, полуводный гипс), которые образуются в мельнице в результате повышенной температуры помола.

Равномерность изменения объема при твердении – признак, обуславливающий целостность изделия из цементной пасты, поскольку цементы с неравномерным расширением объема приводят к снижению или полному разрушению изделия. Причина неравномерного расширения объема – *присутствие* в цементе *свободного (пережженного) оксида кальция более 1,5–2 %*; *оксида магния* в виде высокотемпературной медленно гасящейся формы-периклаза *более 5 %* (по ГОСТ 10178–85*), т.е. соединений, реакции гидратации которых начинаются позднее гидратации основных клинкерных минералов и идут медленнее, кроме того, образованием в твердеющем цементе этtringита *при повышенном содержании* в клинкере *C₃A* и *при избыточном введении гипса* в портландцемент.

Равномерность изменения объема входит в контроль качества продукции и заключается в наблюдении поведения образцов (лепешек *7–8 см* в диаметре, толщиной *1 см*) при кипячении в течение *4 час* через *1 сут* с момента их изготовления. Если на лепешках отсутствуют радиальные по всей поверхности трещины или сетка видимых мелких морщин, искривления и т.д., то это значит, что цемент изменяет объем равномерно. При этом следует иметь в виду, что появление на лепешках трещин усыхания еще до их нагревания в воде вовсе не означает, что цемент недоброкачественный, если на обратной стороне при этом не обнаружены радиальные трещины, доходящие до краев (ГОСТ 310.3–76).

Содержание свободной **CaO** в цементе должно быть *не более 1 %*; при повышенном содержании свободной **CaO** (в результате испытания на равномерность изменения объема) цемент должен быть выдержан в хранилищах до тех пор, пока новое испытание не покажет полную пригодность цемента.

По ГОСТ 10178–85* в исходном клинкере всех разновидностей портландцемента допускается содержание **MgO** *не более 5 %*. Равномерность изменения объема цементов при повышенном содержании в них **MgO** иногда определяют на описанных выше лепешках, пропаривая их в автоклаве под давлением насыщенного пара **2 МПа** по режиму **2+1+1 час** (подъем давления - прогрев при **2 МПа** - охлаждение). Равномерность изменения объема оценивают по ранее указанным признакам.

Примечание: возможно определение равномерности изменения объема в кольце Ле-Шателье при кипячении.

Прочность цементного камня. Механическая прочность цементного камня является важнейшей характеристикой и оценивается пределом прочности при сжатии, изгибе, растяжении и скалывании образцов различной формы. Чем выше механическая прочность затвердевшего камневидного тела (цемента, раствора, бетона) и чем скорее она достигнута, тем выше качество цемента или иного вяжущего вещества.

По активности портландцементов их делят на четыре **марки – 400, 500, 550 и 600**. Величину показателя предела прочности при сжатии цемента через **28 сут** стандартного твердения называют его *активностью*.

Факторы, влияющие на прочность (активность) цемента, могут быть разделены на *химико-минералогические, технологические, технические*. Влияние химических факторов исследовано пока мало.

Минералогический состав портландцемента оказывает чрезвычайно большое влияние на его прочность. При этом следует отличать конечную, максимально достигаемую прочность (получение высокопрочных цементов) и скорость ее нарастания (быстротвердеющие цементы). На прочность к **28 суткам** и на скорость твердения наибольшее влияние оказывает трехкальциевый силикат. Двухкальциевый силикат твердеет медленно, набирая высокую прочность, примерно к году. Трехкальциевый алюминат в сочетании с другими составляющими клинкера способствует быстрому росту прочности в первые сутки твердения. Довольно активно при твердении ведет себя четырехкальциевый алюмоферрит. Если принять 28-суточную прочность за 1 для обычного портландцемента, то коэффициент набора прочности

четырекальциевого алюмоферрита к 3 сут составит **0,36**, к 7 сут – **0,65**, к 1 году – **1,5**, к 25 годам – **2,25** (по данным С.Д. Миронова и Л.А. Малининой).

Помимо химико-минералогических факторов на прочность влияют *технологические факторы*. Сюда в первую очередь следует отнести *водоцементное отношение* – чем меньше эта величина, тем интенсивнее рост прочности и выше ее конечная величина. Такой рост происходит потому, что избыточное по сравнению с нужным количество воды увеличивает пористость цементного камня или бетона, таким путем снижая их плотность и пористость.

Активность цемента связана не только с его *тонкостью помола* - чем она выше до определенного предела, тем выше активность цемента, но и его *гранулометрией*. Цемент полидисперсного гранулометрического состава позволяет получить более плотный цементный камень. Повышенное содержание тонких фракций в цементе обеспечивает быстрое нарастание прочности. Повышенное содержание частиц «средних» размеров **30–50 мкм** положительно сказывается на прочностных показателях на **28 суток** твердения. Чем тоньше измельчен цемент, тем интенсивнее он гидратируется и твердеет. Так, образцы из частиц цемента размером **0–5 мкм** через **24 ч** достигают прочности, равной **75–80 %** от максимальной. Однако абсолютная прочность цементного камня, полученного из такой тонкой фракции, не является относительно самой высокой. Цементный камень, получаемый из фракций соответственно **5–10, 10–20, 20–60 мкм** (или других диапазонов), твердеет медленнее, чем из фракции **0–5 мкм**, но достигает в поздние сроки большей прочности. При этом, чем грубее фракция, тем медленнее твердеет цементный камень и тем позднее он достигает высокой прочности.

Роль отдельных фракций цемента в формировании прочности цементного камня следующая: фракция **0–5 мкм** способствует росту прочности в первые **24 ч** твердения; фракция **7–30 мкм** – основная фракция, определяющая качество цемента в целом; фракция – **30–60 мкм** способствует росту прочности после **28 сут** твердения; фракция **60–200 мкм** и более – медленно гидратируется в течение длительного времени, уплотняя цементный камень.

Причинами высокой гидратационной активности тонких фракций цемента являются их большая удельная поверхность, механохимически активированный поверхностный слой (вплоть до изменения кристаллической структуры) и небольшая толщина защитных оболочек, возникающих на зернах в процессе гидратации.

Тот факт, что прочность цементного камня, полученного на основе тонких фракций, относительно невысока, объясняется рыхлостью его физической структуры, слабой закристаллизованностью цементного геля и меньшей площадью контактов между частицами гидратов. В цементном камне на основе

более грубых частиц цемента реакции гидратации протекают медленнее и при меньших пересыщениях жидкой фазы, что способствует образованию игольчатых и волокнистых кристаллов **CSH**, которые совместно с цементным гелем складывают плотную и прочную структуру твердения. Следовательно, не всегда быстrogидратирующийся цемент образует высокопрочный, цементный камень, поэтому для получения быстротвердеющего и одновременно высокопрочного цементного камня необходимо подбирать оптимальный гранулометрический состав портландцемента с учетом, конечно, и минералогического состава клинкера.

Кривая зависимости марочной прочности портландцемента от его удельной поверхности имеет экстремум, чаще всего приходящийся на значения удельной поверхности в пределах **350–450 м²/кг**. При этом количество фракции **0–30 мкм** в цементе составляет не ниже **70 %**.

Температура оказывает на прочность цементного камня большое влияние, ускоряя процессы его схватывания и твердения.

С увеличением температуры твердеющей цементной массы в пределах от **298** до **373K** и более скорость гидратации цемента возрастает. При этом увеличивается и скорость выделения собственного тепла гидратации цемента. Следствием ускоренного процесса гидратации вяжущего является более интенсивный рост прочности цементного камня, чем в случае твердения его при нормальных условиях. Это обстоятельство широко используется на практике для интенсификации твердения бетонов при применении методов пропаривания и автоклавирования изделий.

При повышенных температурах механизм гидратации минералов остается таким же, как и при **298K**. Минералогический состав высокотемпературных гидратов также не претерпевает больших изменений: в большем объеме внедряются **Al³⁺**, **Fe³⁺**, **SO₄²⁻** в структуру гидросиликатов кальция, возрастает доля моногидросульфoалюмината кальция за счет убывания эттрингита, увеличивается количество **CaCO₃** в системе.

Весьма значительно изменяется кристаллическая структура твердевшего при повышенной температуре цементного камня: с повышением температуры возрастает степень закристаллизованности продуктов реакции. Так, в интервале температур от **298** до **368K** тоберморитовый гель постепенно превращается в хорошо закристаллизованные соединения тоберморитоподобных фаз и образуются крупные кристаллы **Ca(OH)₂**. В кристаллической форме выделяются моногидросульфoалюминат и гидроалюминаты кальция.

Укрупнение кристаллогидратов, а также процессы перекристаллизации метастабильных продуктов приводят к развитию различного рода деструктивных процессов в твердеющем цементном камне

(кристаллизационное давление, напряжения, трещины и т.п.), что снижает абсолютные значения достигаемой им прочности по сравнению с цементным камнем, длительно твердевшим при нормальных условиях.

При низких положительных (**283, 278, 274K**) и отрицательных (**272, 253K**) температурах портландцемент гидратируется медленнее: на **18–26 %** при **271K** (по сравнению со степенью его гидратации при **298 K**), на **5–8 %** при **268K** и всего лишь на **1–2 %** при **253K**. Минералогический состав гидратов, образующихся при низких температурах твердения, в основном такой же, как и при гидратации вяжущего в нормальных условиях.

Существующие ГОСТ 10178–85* «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия» и ГОСТ 310.1–76 – ГОСТ 310.4–76 «Цементы. Методы испытаний» регламентируют испытание цемента и определение их свойств. В соответствии с этими стандартами прочность цемента определяют по показателям прочности при изгибе балочек размером **40x40x160 мм** и при сжатии половинок тех же образцов. Балочки формуют из раствора состава **1:3** (цемент:песок) по массе, уплотняя вибрацией в течение **3 мин** на виброплощадке с амплитудой **0,35 мм** и частотой колебаний **3000 в 1 мин** и испытывают через **28 сут** с момента изготовления.

Для испытаний применяют специальный стандартный песок Вольского месторождения (ГОСТ 6139–2003). Всевозрастающее значение начинают приобретать неразрушающие методы определения прочности цемента и бетонов с помощью ультразвуковых колебаний.

Растворы готовят при водоцементном отношении, равном **0,4**, причем их консистенция по расплыву конуса после **30** встряхиваний на столике должна характеризоваться диаметром в пределах **106–115 мм**. При меньшем расплыве конуса количество воды в растворе увеличивают до получения распыла конуса **106–108 мм**. Если же распыл окажется более **115 мм**, то количество воды уменьшают до получения распыла конуса **113–115 мм**. Диаметр конуса после **30** встряхиваний на столике в течение **30 сек** измеряют штангенциркулем по нижнему основанию в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее значение. Балочки из раствора хранят в формах над водой в течение **24+2 час**, помещая в ванну с гидравлическим затвором. Далее их расформовывают и хранят в воде (температура **20°C+2**) в течение **27 сут**.

Через **28 сут** с момента изготовления и не позднее чем через **1ч** после извлечения из воды, балочки испытывают на прочность при изгибе, а полученные половинки – на сжатие.

Показатель предела прочности при сжатии, достигаемой через **28 сут** стандартного твердения, вычисляют как среднее арифметическое четырех

наибольших результатов испытания. Этот показатель называют *активностью цемента*.

С.А. Миронов и И.М. Френкель предлагают приблизительно определять активность цементов ускоренным способом по результатам испытаний их в бетоне, подвергая пропариванию. Приближенные данные об активности цемента применительно к ГОСТ 10178–76 и ГОСТ 310–76 можно получать через **16-18 час** с момента изготовления образцов. С.М. Рояк и др. предлагают определять марку цемента ускоренным методом при тепловлажностной обработке образцов пропариванием и последующим определением прочности образцов с учетом установленной графической зависимости.

Таблица 1. Показатели прочности портландцементов по ГОСТ 10178-85

Обозначение цемента	Гарантированная марка	Предел прочности, МПа (кгс/см ²)			
		при изгибе в возрасте, сут		при сжатии в возрасте, сут	
		3	28	3	28
ПЦ-Д0, ПЦ-Д5, ПЦ-Д20, ШПЦ	300	-	4,4 (45)	-	29,4 (300)
	400		5,4 (55)		39,2 (400)
	500		5,9 (60)		49,0 (500)
	550		6,1 (62)		53,9 (550)
	600		6,4 (65)		58,8 (600)
ПЦ-Д20-Б	400	3,9 (40)	5,4 (55)	24,5 (250)	39,2 (400)
	500	4,4 (45)	5,9 (60)	27,5 (280)	49,0 (500)
ШПЦ-Б	400	3,4 (35)	5,4 (55)	21,5 (220)	39,2 (400)

Примечание: марку цемента 300 сегодня **не выпускают**

Таблица 2. Показатели прочности портландцементов по ГОСТ 31108-2020

Класс, подкласс прочности цемента	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте			
	2 сут, не менее	7 сут, не менее	28 сут	
			не менее	не более
32,5М*	-	12	32,5	52,5
32,5Н	-	16		
32,5Б	10	-		
42,5М*	-	16	42,5	62,5
42,5Н	10	-		
42,5Б	20	-		
52,5М*	10	-	52,5	-
52,5Н	20	-		
52,5Б	30	-		

* Подкласс применяют только для цементов типа **ЦЕМ III**

По показателям прочности портландцементы делят на четыре марки: **400, 500, 550, 600**. При этом образцы (балочки и их половинки) при испытании должны иметь пределы прочности при изгибе и сжатии не ниже значений, приведенных в **табл. 1 (см. ГОСТ 31108-2016)**.

Отношение прочности насыщенных водой образцов к прочности высушенных, одинаковых по составу и условиям твердения, называется **коэффициентом размягчения**. Для цементных образцов это отношение обычно колеблется в пределах $0,8-0,9$, а для гипсовых – $0,3-0,5$. Значение этого отношения характеризует водостойкость материала. Коэффициент размягчения зависит от вида материала и от плотности испытываемых образцов.

Тепловыделение при твердении. Поскольку гидратация клинкерных минералов – экзотермический процесс, то при формировании цементного камня или бетона на его основе происходит выделение тепла. Тепловыделение приводит к разогреву всей массы бетона, что в зависимости от условий строительства может играть положительную и отрицательную роль. При зимнем бетонировании высокое тепловыделение замедляет охлаждение уложенного бетона, способствует развитию процессов гидратации и твердения и, таким образом, полезно. В других условиях тепловыделение приводит к появлению термонапряжений в массе бетона, в результате чего могут возникнуть и развиваться трещины, приводящие к разрушению. Тепловыделение зависит в основном от *минералогического состава* цемента. Эта зависимость связана, во-первых, с суммарным термохимическим эффектом различных клинкерных минералов при гидратации и, во-вторых, со скоростью взаимодействия этих минералов с водой. Установлено, что C_3S и C_3A отличаются не только большим суммарным, но и быстрым тепловыделением, в то время как C_2S и C_4AF низкотермичны и выделяют тепло медленно. Увеличивают тепловыделение цемента повышение *содержания* в клинкере *стеклофазы*, увеличение *тонкости помола*, *различные добавки*, ускоряющие гидратацию и твердение.

Усадка и набухание цементного камня. Если цементный образец поместить в среду, относительная влажность которой ниже равновесной влажности образца, то последний со временем уменьшит свои линейные размеры – дает усадку. Это явление происходит вследствие высыхания изделия – испарения свободной воды из пор и капилляров, адсорбционной и цеолитно-связанной воды. С высыханием воды связано проявление капиллярных сил – сил сжатия, которые могут быть столь значительными, что вызовут появление напряжений в материале и трещин.

Существуют и другие представления о природе сил, ведущих к усадке. Если же влажность окружающей среды выше равновесной влажности образца, то его

водосодержание начинает расти и сопровождается увеличением объема образца – его набуханием. Набухание тоже вызывает появление внутренних напряжений, но менее интенсивных, чем усадка. Суть процессов набухания заключается в проявлении осмотических сил в гелевых слоях образца, помещенного в воду. Деформации набухания и усадки относятся к физическим самопроизвольным деформациям. Усадка может происходить и за счет химических процессов – тогда она называется **контракцией**, например при уплотнении геля цементного камня вследствие гидратации клинкерных минералов.

На величину усадки цементного камня влияет много факторов. Так, алитовые и более грубомолотые цементы меньше склонны к усадке.

Снижение *водоцементного отношения*, при прочих равных условиях *введение порошкообразных заполнителей* также приводят к снижению усадки. Повышают усадку *добавка хлористого кальция, обработка* цементного камня паром под давлением *в автоклавах*. Если речь идет о бетоне, то усадку понижает *введение* крупного и мелкого *заполнителей*. Количественно величина деформации усадки составляет 3–5 мм/м и к двум годам практически исчезает. Существует еще ряд факторов, влияющих в конечном итоге на стойкость цементного изделия, которые можно было бы назвать внутренними причинами стойкости цементного камня.

Трещиностойкость. Трещины возникают в результате напряжений и деформаций в цементном камне или бетоне в результате механических нагрузок, температурных, влажностных и объемных перепадов. Трещиностойкость бетонов можно повысить, снижая *усадку, ползучесть* цементного камня, а также вводя *добавки поверхностно-активных веществ*.

Ползучесть цементного камня или изделия из него – способность необратимо деформироваться под действием механических и других факторов. Ползучесть зависит от достигнутой прочности цементного камня или бетона перед нагрузкой и тем меньше, чем выше прочность перед нагружением. Она практически затухает к двум годам после нагружения конструкции. Оказывает влияние на ползучесть *минералогический состав* цемента. По мнению исследователей, суть этого явления заключается в поведении гелевой части цементного камня. Волженский А.В. считает, что линейная ползучесть является следствием упруговязкого течения цементного камня в результате длительно действующих напряжений и что она в первую очередь зависит *от размеров частичек новообразований*.

2. Методические указания к выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа № 1.

Определение насыпной плотности портландцемента

1.1. Краткие теоретические сведения

Насыпная плотность порошкообразного материала – масса единицы объема рыхлонасыпанного материала в естественном состоянии, включая поры.

Для порошкообразных материалов различают два вида определения насыпной объемной плотности: в рыхлом и уплотненном состоянии. Насыпная объемная плотность материала учитывается при проектировании и расчете объема емкостей для складирования (бункеров, силосов и др.) и транспортировке порошкообразных материалов, т.к. в процессе хранения и транспортировки материала уплотняется, его объемная плотность увеличивается на **15-30 %**. Насыпная плотность ряда вяжущих материалов приведена в **табл. 3**.

При проектировании и расчете складских и транспортных емкостей насыпную объемную плотность портландцемента принимают равной **1200 кг/м³**.

Величина объемной плотности материала косвенно связана с другими строительными свойствами портландцемента, например, чем меньше значение объемной плотности портландцемента, тем меньше его истинная плотность. Значения этих свойств цемента обуславливает области применения портландцемента. Так цементы с высокими значениями объемной и истинной плотности используются при строительстве защитных устройств и сооружений от излучений, цементирования нефтяных и газовых скважин. Насыпная объемная плотность материала в рыхлом состоянии определяется при помощи воронки или наклонной плоскости, **рис.1**.

Воронка (рис.1а) состоит из перевернутого усеченного конуса **1**, который переходит в трубку **2** с задвижкой **3**. Под трубкой конуса помещается литровый сосуд **4**. Расстояние между верхним обрезом сосуда и задвижкой равно **50 мм**.

Наклонная плоскость (рис.1б) представляет собой металлический или деревянный, обитый железом лоток, расположенный под углом **45°**.

1.2. Методика выполнения лабораторной работы

Сущность метода определения насыпной плотности заключается во взвешивании портландцемента в естественном (рыхлонасыпанном) и /или/ уплотненном состоянии в мерном сосуде.

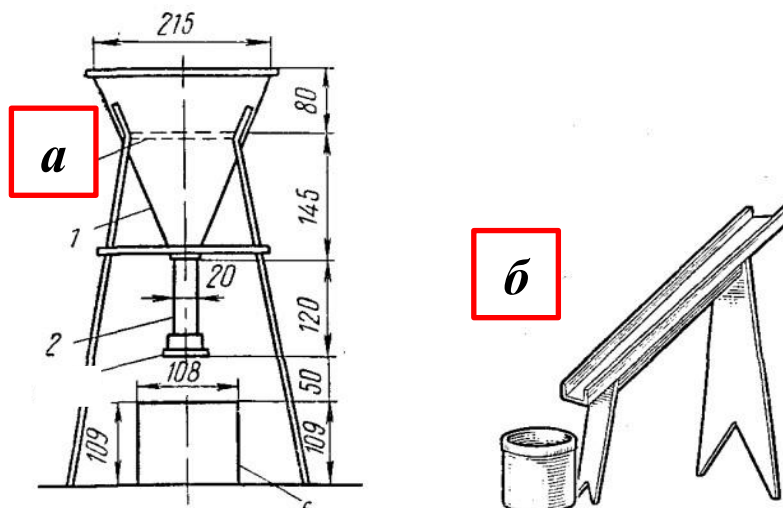


Рис. 1. Воронка, наклонная плоскость для определения насыпной плотности порошкообразных материалов

Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:

1. Воронка или наклонная плоскость для определения насыпной плотности.
2. Сосуд металлический вместимостью 1 л (диаметр и высота 108 мм).
3. Совок.
4. Портландцемент.
5. Весы электронные.
6. Линейка металлическая.

Проведение испытания:

В воронку прибора (*рис.1а*) при закрытой задвижке насыпают **3-5 кг** портландцемента (без комков), после чего открывают задвижку и, помешивая порошок на сите, заставляют его проходить сквозь сито и наполнять литровый сосуд. Когда сосуд наполнится с некоторым избытком, задвижку закрывают, а излишек цемента срезают металлической или деревянной линейкой вровень с краями сосуда, держа линейку в наклонном положении и прижимая ее к краям сосуда. При этом следует избегать толчков, способствующих уплотнению материала. Сосуд с цементом и сосуд без материала взвешивают.

При определении насыпной объемной плотности на наклонной плоскости (*рис.1б*) под нижний обрез лотка плоскости помещается литровый сосуд, причем расстояние между нижним обрезом наклонной плоскости и верхним краем сосуда должно быть равно **50 мм**. Цемент насыпают на верхнюю часть плоскости совком, держа его на расстоянии **50 мм** над плоскостью. Когда сосуд

наполнится материалом с некоторым избытком, излишек срезают и далее поступают так, как описано выше.

Затем опыт повторяют, уплотняя материал в сосуде постукиванием **5-6 раз** и добавляя новые порции цемента в сосуд. Снова сосуд с уплотненным материалом взвешивают. Определение насыпной плотности портландцемента производят **три раза**, при этом каждый раз берут новую порцию цемента, результат представляют в виде среднеарифметического значения.

Примечание: при определении насыпной плотности материала и для перевода из единиц массы в объемные единицы при приемочном контроле испытания проводят в мерном цилиндрическом сосуде вместимостью 10 л.

Обработка результатов:

Насыпную плотность портландцемента (ρ_n) в стандартном (рыхлом) и уплотненном состояниях вычисляют по формуле:

$$\rho_n = (m_1 - m) / V, \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

где m – масса мерного сосуда, кг;

m_1 – масса мерного сосуда с портландцементом, кг;

V – объем сосуда, м³.

Примечание: при текущем контроле в производстве портландцемента необходимо определять объемную плотность сырьевой смеси (шлама) и полуфабриката-клинкера. Объемная плотность клинкера обычно составляет 1550–1650 г/л и служит характеристикой степени его спекания. Чем больше величина объемной плотности клинкера, тем выше степень спекания клинкера.

Объемная плотность сырьевого шлама составляет 1550–1750 г/л и характеризует количественное соотношение между сырьевой смесью (сухим веществом) и водой. Увеличение объемной плотности сырьевого шлама указывает на снижение его влажности, и, наоборот, уменьшение объемной плотности сырьевого шлама свидетельствует об увеличении его влажности.

Объемная плотность клинкера или сырьевой муки определяется так же, как насыпная объемная плотность портландцемента в рыхлом состоянии.

Вывод по работе. Приводится характеристика насыпной объемной плотности исследуемого портландцемента и сравнивается с данными **табл.3**.

Таблица 3. Насыпная плотность различных вяжущих веществ

Наименование материала	Насыпная плотность, кг/м ³	
	в рыхлом состоянии	в уплотненном состоянии
Портландцемент	900–1300	1500–2000
Пуццолановый портландцемент	800–1000	1200–1600
Глиноземистый цемент	1000–1300	1600–2000
Известково-пуццолановое вяжущее	600–800	900–1200

Известково-шлаковое вяжущее	800–900	1200–1400
Строительный гипс	800–1100	1250–1450
Ангидритовое вяжущее	850–1100	1200–1500
Высокообжиговый гипс	900–1200	1300–1700
Воздушная известь (пушонка)	400–450	500–700
Гидравлическая известь	500–800	850–1100

Лабораторная работа № 2

Определение степени дисперсности портландцемента

2.1. Краткие теоретические сведения

Степень дисперсности вяжущих веществ характеризуется: **тонкостью (тониной) помола**, определяемой ситовым анализом; **удельной поверхностью** и **зерновым составом**, определяемыми при помощи поверхностемеров, сепарационных и седиментационных приборов и других аппаратов. Размер, форма и морфологические особенности поверхности частиц вяжущих веществ могут определяться с помощью оптического и электронного микроскопов.

Необходимая дисперсность цементных порошков достигается путем помола в мельницах, причем производительность последних зависит в значительной мере от размолоспособности измельчаемых материалов.

Для портландцементного клинкера размолоспособность определяется главным образом его минералогическим составом. Клинкер с высоким содержанием трехкальциевого силиката размалывается до необходимой тонкости помола значительно быстрее, чем клинкер с высоким содержанием двухкальциевого силиката. Крупность зерен после помола сильно влияет на основные свойства цемента. Для механической прочности значение имеет не только малый размер зерен, но и зерновой состав (соотношение зерен разных размеров) получаемого портландцемента.

2.2. Методика выполнения лабораторной работы

Степень дисперсности портландцемента в лабораторных условиях оценивается при определении его тонины помола ситовым анализом и удельной поверхности на приборе ПСХ-2.

2.2.1. Определение тонины помола цемента методом ситового анализа

Сущность метода определения тонины помола цемента заключается во взвешивании остатков на ситах при рассеивании портландцемента на стандартном наборе сит.

Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:

1. Портландцемент.
2. Сушильный шкаф.
3. Стандартный набор сит (сита № 02, 008).
4. Весы электронные.
5. Просеивающий аппарат.

Проведение испытания:

Навеску цемента в **50 (100) г**, высушенного при **110±5 °С** в сушильном шкафу в течение **1 час**, высыпают на верхнее сито стандартного набора сит. Закрыв сито крышкой, просеивают цемент на механическом приборе или вручную, встряхивая прибор в наклонном положении и постепенно поворачивая его на полный оборот вокруг вертикальной оси. В конце опыта контрольное просеивание производят над бумагой при снятом доньшке. Просеивание считается законченным, если в течение **1 мин** сквозь сито проходит **не более 0,05 г** цемента. Сита должны быть совершенно сухими и после опыта их надо тщательно прочищать. *Тонкость помола* цемента (% мас) определяют с точностью до **0,1 %** путем взвешивания остатка цемента на сите. Просеивание материалов вручную требует длительного времени и потому оно может быть заменено механизированным просеиванием в соответствующих приборах или др. Продолжительность просеивания на этом аппарате составляет **20 мин**.

Обработка результатов:

Тонину помола портландцемента рассчитывают по формуле:

$$P = (50 - m_1) \cdot 100 / 50, \% \quad (2)$$

где ***P*** – тонина помола (остаток на сите №02 и №008), % ;

m₁ – масса остатка на данном сите (№02 и №008), г;

50 – исходная навеска для просеивания, г.

Примечание: при определении тонкости помола сырьевого шлама и других продуктов мокрого помола навеску материала промывают сквозь сито водой до тех пор, пока вода, проходящая через сито, не станет прозрачной. Остаток после мокрого просеивания смыть с сита в фарфоровую чашку, дать воде отстояться, слить ее, высушить остаток в сушильном шкафу при 100–110 °С в течение 2 час и взвесить сухой остаток.

Вывод по работе. Проводится сравнение результатов тонины помола исследуемого портландцемента с данными **табл.4**.

Таблица 4. Тонкость помола вяжущих материалов

Наименование вяжущего вещества	ГОСТ или ТУ	Максимальные остатки на ситах, %		
		№ 063	№ 02	№ 008
Портландцемент	ГОСТ 10178–85	–	–	15
Пуццолановый портланд-цемент	ГОСТ 10178–95	–	–	15
Шлакопортландцемент	ГОСТ 10178–85	–	–	15
Белый портландцемент	ГОСТ 965–89	–	–	12
Глиноземистый цемент	ГОСТ 969–91	–	–	10
Гипсоглиноземистый цемент	ГОСТ 11052–74	–	–	10
Известково-пуццолановое вяжущее	ГОСТ 2544–76	–	5	25
Известково-шлаковое вяжущее	ГОСТ 2544–76	–	5	25
Воздушная известь молотая негашеная	ГОСТ 9179–77	–	1	10
Ангидритовое вяжущее	–	–	–	15
Строительный гипс	–	–	15	–
Формовочный гипс:	ГОСТ 125–79	–	0,5	2,5
Технический высокопрочный гипс	ТУ 31–57	–	2	–
Медицинский гипс	ГОСТ 125–79	–	8	–
Высокообжиговый гипс	–	2	10	–

Примечание: В самом стандарте ГОСТ 31108-2020 нет конкретных числовых значений для тонкости помола. Стандарт устанавливает общие требования к общестроительным цементам, а тонкость помола определяется на основе отраслевых документов и технологических регламентов конкретных производителей.

2.2.2. Определение удельной поверхности портландцемента методом воздухопроницаемости (на приборе ПСХ - 2)

Сущность метода определения удельной поверхности цемента заключается в измерении сопротивления, оказываемого воздуху, просасываемому через слой цемента установленной толщины (высоты) и площади поперечного сечения, уплотненного до определенного содержания пустот в единице объема.

Удельной поверхностью порошкообразного материала называют поверхность единицы массы или объема материала, выраженную в $\text{см}^2/\text{г}$ или $\text{см}^2/\text{см}^3$.

Величина удельной поверхности портландцемента влияет на интенсивность протекания реакций, происходящих при твердении портландцемента. Чем больше удельная поверхность цемента, тем выше его тонина помола, больше площадь соприкосновения цемента с водой при его затворении, т.е. полнее и быстрее проходят реакции гидратации и выше прочность затвердевшего цементного камня. Обычно портландцемент размалывают до удельной поверхности $2900\text{--}3200 \text{ см}^2/\text{г}$, но чем тоньше размолот цемент (до $6500 \text{ см}^2/\text{г}$), тем выше предел прочности при сжатии затвердевшего камня.

Определение удельной поверхности цемента методом воздухопроницаемости. Поверхностемер (ПСХ-2) для определения удельной поверхности цемента (рис.2,а – общий вид) состоит из пяти основных частей: гильзы 1, манометра-аспиратора 2, крана 3, регулятора разрежения 4 и источника разрежения 5 (груша или водоструйный насос). Гильза (рис.2,б), в которую помещается испытуемый цемент, представляет собой стальную трубку 1 с внутренним диаметром $25,2 \pm 0,1 \text{ мм}$ и площадью поперечного сечения 5 см^2 . В нижней части гильзы выточены заплечики, на которые помещается перфорированный диск 2. Ниже уровня перфорированного диска имеется трубка 3, служащая для присоединения гильзы к прибору. Гильза устанавливается в обойму доньшка 4. Перфорированный диск, на который помещается слой цемента, изготавливается из металлической пластинки толщиной 2 мм с отверстиями диаметром 1,2 мм, равномерно распределенными по всей площади диска. Плунжер (рис.2,в) служит для уплотнения цементного порошка в гильзе и состоит из корпуса 1, упорного кольца 2, выточенного из куска металла вместе с корпусом, и рукоятки 3.

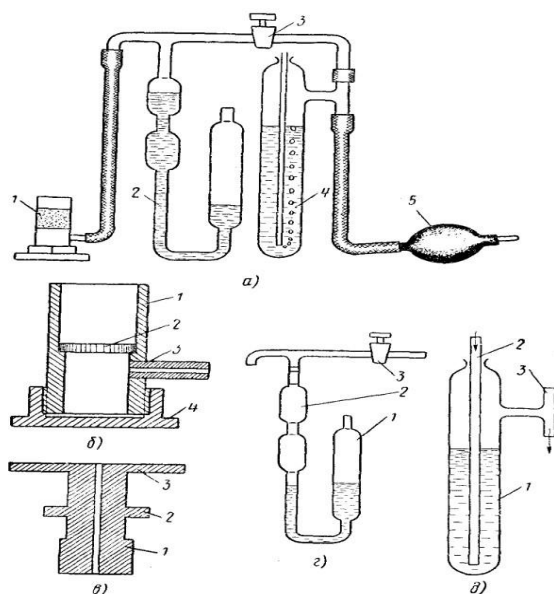


Рис. 2. Прибор ПСХ-2 для определения удельной поверхности цемента

Вдоль оси плунжера просверлен канал для прохода воздуха. Плунжер должен быть подогнан к гильзе с просветом в **0,1 мм**. Необходимо, чтобы нижняя плоскость плунжера была перпендикулярна к его вертикальной оси. Упорное кольцо должно быть на такой высоте от нижней плоскости плунжера, чтобы при введении последнего в гильзу до соприкосновения кольца с верхними краями гильзы расстояние между нижней плоскостью плунжера и перфорированным диском составляло **15±0,5 мм**.

Манометр-аспиратор (**рис.2,г**) представляет собой стеклянный сосуд, наполненный водой, и служит для создания разрежения, вызывающего просасывание воздуха через слой порошка, а также для измерения этого разрежения.

Внутренний диаметр манометра-аспиратора – около **5 мм**, высота – **250 мм**. Одно колено **1** манометра открыто, второе **2** присоединяется к гильзе и к регулятору разрежения. На этом колене манометра имеются два уширения: верхнее, предназначенное для измерений удельной поверхности цементных порошков с большой удельной поверхностью, нижнее – с малой удельной поверхностью. Выше и ниже уширений имеются отметки-риски. Кроме того, нанесены: нулевая отметка, до которой манометр-аспиратор наполняется жидкостью, и верхняя, до которой должен подниматься уровень жидкости перед началом измерения. Для отключения манометра-аспиратора от регулятора разрежения служит кран **3**.

Гидравлический регулятор разрежения (**рис.2,д**) состоит из стеклянного сосуда **1**, наполненного насыщенным раствором поваренной соли. В сосуд впаяна стеклянная трубка **2** для ввода воздуха и трубка **3** для присоединения к прибору. Регулятор заполняют раствором до такого уровня, чтобы при создании разрежения подкрашенная жидкость в закрытом колене манометра-аспиратора поднималась до высоты, отмеченной двумя точками. Разрежение создают при помощи водоструйного насоса. При отсутствии последнего можно пользоваться обычной грушей-аспиратором с клапанами для движения воздуха в одном направлении.

Подготовка к проведению испытаний:

Перед испытанием цемент просеивают через сито **№ 09** и навеску в **25 г** сушат в течение **2 часов** при **105–110 °С** в сушильном шкафу. Проверяют герметичность гильзы и соединений прибора, для чего плотно закрывают гильзу сверху резиновой пробкой, создают разрежение в манометре-аспираторе и закрывают кран. При полной герметичности гильзы и соединений уровень жидкости в манометре-аспираторе не должен снижаться. В противном случае следует отыскать место присоса воздуха и добиться полной герметичности.

Величину навески цемента для испытаний вычисляют по формуле:

$$G = \rho_{ист} \cdot V \cdot (1 - \Pi), \text{ г или } G \approx 3,33 \cdot \rho_{ист}, \text{ г} \quad (3)$$

где $\rho_{ист}$ – истинная плотность цемента, г/см³;

V – объем слоя цемента в гильзе, см³;

Π – пористость слоя цемента, для обеспечения единообразия рекомендуют принимать $\Pi = (0,48-0,52) \pm 0,01$.

Проведение испытаний:

Для подготовки цемента к испытанию в гильзу помещают кружок фильтровальной бумага малой или средней плотности, на который высыпают навеску цемента *массой 10 г*. Слегка постукивая по стенкам гильзы, накладывают на слой цемента второй кружок фильтровальной бумаги, и образец при помощи плунжера прессуют нажатием руки, по шкале нониуса определяют высоту слоя цемента в кювете, плунжер удаляют. Открывают кран между манометромаспиратором и регулятором разрежения. Приводят в действие водоструйный насос или другой источник разрежения (например, с помощью груши).

После того как в закрытом колене манометра-аспиратора жидкость поднимется до середины высоты верхней колбы, кран закрывают. Уровень жидкости в закрытом колене манометра-аспиратора опускается, что соответствует просасыванию воздуха через слой материала-цемента, находящегося в гильзе. Когда уровень жидкости доходит до отметки риски **1**, находящейся над верхним расширением, пускают в ход секундомер и останавливают его, когда уровень жидкости дойдет до отметки риски **2**. Если уровень жидкости понижается слишком быстро, что не позволяет точно фиксировать момент прохода мениска жидкости от первой до второй риски, для измерений следует пользоваться нижними рисками **3** и **4**.

Определение продолжительности просасывания воздуха для одной и той же навески производят трижды и для дальнейших расчетов используют среднее арифметическое значение. При измерениях, требующих повышенной точности, необходимо производить 2–3 повторных определения с отдельными навесками цемента.

Обработка результатов:

Удельную поверхность цемента вычисляют по формуле:

$$S_{уд} = K \cdot M \cdot \sqrt{t} / G, \text{ см}^2/\text{г} \quad (4)$$

где K – постоянная прибора, указанная в паспорте для *рисок 1–2* и *3–4*;

M – величина, зависящая от температуры опыта и высоты слоя материала в кювете, находится по справочным таблицам;

t – время снижения уровня жидкости от *рисок 1–2* или от *3–4*, с.

G – исходная навеска для определения удельной поверхности материала, г.

Вывод по работе. Приводятся данные о результатах эксперимента по определению удельной поверхности цемента.

Лабораторная работа № 3

Определение нормальной густоты цементного теста

3.1. Краткие теоретические сведения

Под *нормальной густотой* понимают такую консистенцию цементного теста или раствора, которая обеспечивает достаточную их удобообрабатываемость или подвижность и позволяет плотно укладывать их в форму. Нормальную густоту принято выражать количеством воды (%), необходимым для получения теста или раствора указанной консистенции.

Определение нормальной густоты цементного теста должно предшествовать определению сроков схватывания, равномерности изменения объема и механической прочности вяжущих материалов (при испытаниях образцов из раствора жесткой консистенции).

Вместе с тем определение нормальной густоты цементного теста имеет и самостоятельное значение, так как характеризует водопотребность вяжущего материала, являющуюся важным показателем.

Обычно для протекания химических реакций гидратации цементов требуется значительно меньше воды, чем для получения теста нормальной густоты. Чем меньше берется воды для получения удобообрабатываемого раствора нормальной густоты, тем выше будет прочность затвердевшего вяжущего. Этим объясняется стремление к понижению водопотребности цемента путем введения различных добавок или другими способами.

Таблица 5. Нормальная густота гидравлических вяжущих веществ

Наименование материала	Нормальная густота, %
Портландцемент	24–28
Шлакопортландцемент	26–30
Пуццолановый портландцемент	30–40
Глиноземистый цемент	23–28
Известково-пуццолановое вяжущее	30–60
Известково-шлаковое вяжущее	28–40

3.2. Методика выполнения лабораторной работы

Определение нормальной густоты цементного теста производят при помощи прибора Вика (**рис.3**), состоящего из цилиндрического стержня **2**, свободно перемещающегося в обойме станины **1**. Стержень закрепляют на нужной высоте с помощью зажимного винта или другого стопорного устройства **7**. Указатель **6** служит для отсчета перемещения стержня относительно шкалы **3**, прикрепленной к станине и разделенной на миллиметры. При определении нормальной густоты цементного теста в нижнюю часть стержня вставляют металлический цилиндр – пестик **5**, (**рис. 3,б**). Он изготавливается из нержавеющей стали, имеет полированную поверхность. Диаметр пестика $d=10\pm0,2$ мм, а длина $l=50$ мм. Диаметр закрепляемой части пестика $d=5$ мм, длина $l=14$ мм, масса пестика 35 ± 1 г.

Поверхность пестика должна быть гладкой и чистой, не иметь искривлений. Масса всей перемещающейся части прибора составляет 300 ± 2 г.

Кольцо **8** (**рис.3,г**) для укладки теста и пластинка **9**, на которую устанавливают кольцо во время испытания, изготавливают из материала, не впитывающего воду (нержавеющая сталь, пластмасса и др.).

Кольцо имеет следующие размеры: внутренние диаметры – верхний $d = 65\pm5$ мм, нижний $d_1 = 75\pm5$ мм; высоту кольца $h = 40\pm5$ мм.

Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. Портландцемент. | 5. Чашка для затворения цементного теста. |
| 2. Сушильный шкаф. | 6. Лопатка для перемешивания. |
| 3. Весы электронные. | 7. Секундомер. |
| 4. Цилиндр емкостью 250 мл. | 8. Прибор Вика с пестиком. |

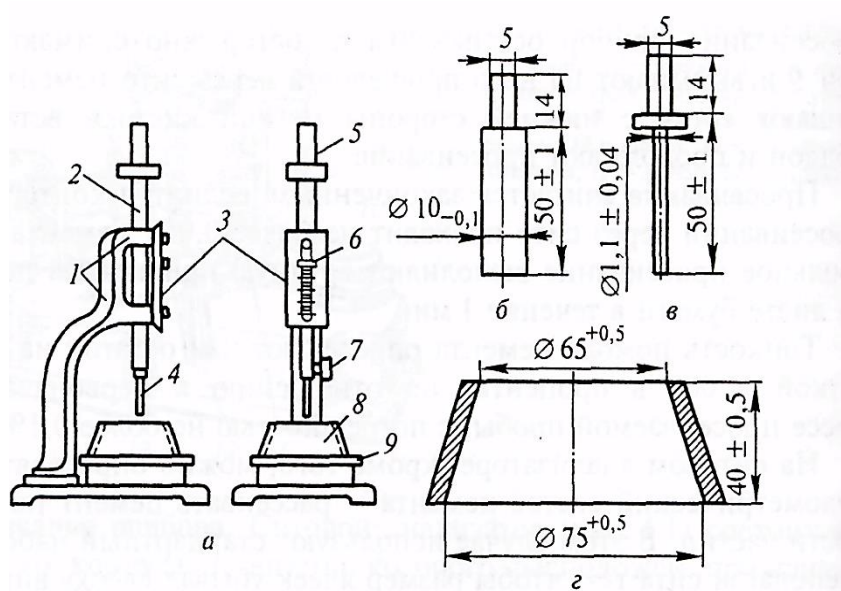


Рис.3. Прибор Вика (а) для определения нормальной плотности и сроков схватывания цементного теста и приспособления к нему (б-г):

- 1 – станина; 2 – стержень; 3 – шкала; 4 – игла (в);
 5 – пестик Тетмайера (б); 6 – указатель; 7 – винт; 8 – кольцо;
 9 – стеклянная (металлическая) пластина

Подготовка к испытаниям:

Перед испытанием следует убедиться в том, что стержень прибора свободно опускается, а также проверить нулевое показание прибора, приведя пестик в соприкосновение с металлической или стеклянной пластинкой, на которой расположено кольцо. В случае отклонения от нуля шкалу прибора соответствующим образом передвигают. Кольцо и пластинку протирают машинным маслом.

Проведение испытания:

Нормальную плотность цементного теста определяют путем погружения пестика в кольцо, заполненное тестом, причем пестик должен погрузиться в тесто не доходя до дна пластинки, расположенной под кольцом, на **5–7 мм**.

Для затворения цементного теста рекомендуется применять металлическую чашку сферической формы **диаметром 400 мм, высотой 100 мм и толщиной стенок 2–3 мм**. Для перемешивания следует пользоваться стальной лопаткой **диаметром 100 мм и толщиной 1–2 мм**.

Для определения нормальной плотности цементного теста отвешивают **400 г** цемента с точностью до **1 г**, цемент помещают в чашку, делают в цементе углубление, куда в один прием вливают воду, отмеренную с точностью до **0,5 мл**. После этого углубление немедленно заполняют цементом и спустя **30 с**

осторожно перемешивают, затем энергично растирают стальной лопаткой попеременно во взаимно перпендикулярных направлениях. Продолжительность перемешивания цемента с водой составляет **5 мин**, считая с момента вливания воды.

Кольцо, заполненное в один прием цементным тестом, пять-шесть раз встряхивают, постукивая пластинкой о стол. Затем избыток теста срезают смоченным водой ножом и им же заглаживают поверхность теста. После этого пестик в центре кольца приводят в соприкосновение с поверхностью теста и закрепляют стержень винтом, вслед за чем, быстро отвинчивая закрепляющий винт, освобождают стержень и предоставляют пестику свободно погружаться в тесто. Через **30 с** с момента освобождения стержня производят отсчет погружения пестика в тесто по шкале. Если пестик опускается ниже **5 мм** или выше **7 мм**, изменяют количество воды и вновь затворяют тесто, добиваясь консистенции, соответствующей нормальной густоте.

Количество воды, добавляемой для получения теста нормальной густоты, выражают в % (мас) от массы цемента и определяют с точностью до **0,25 %**.

Вывод по работе. Приводятся данные о результатах определения нормальной густоты портландцемента.

Лабораторная работа № 4

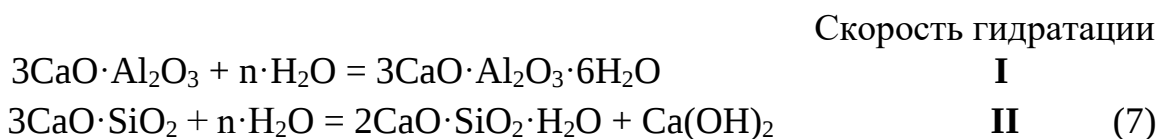
Определение сроков схватывания портландцемента

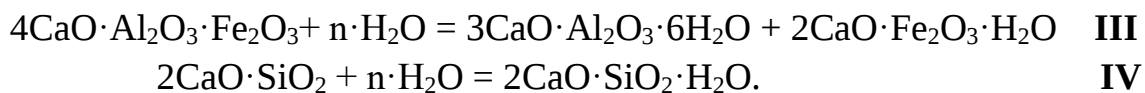
4.1. Краткие теоретические сведения

Схватыванием называют процесс, при котором происходит загустевание цементного теста и приобретение им некоторой механической прочности.

На *сроки схватывания* цемента влияют множество технологических факторов, главные из которых – химико-минералогический состав портландцемента, содержание гипса, температура при твердении цемента, водоцементное отношение.

При затворении цемента водой минералы, составляющие его, взаимодействуют с водой с различной скоростью и могут быть по следующим реакциям:





Быстрее всего взаимодействует с водой $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, он оказывает коагулирующее действие на коллоидный раствор гидросиликата кальция и чем больше в цементе содержание $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, тем быстрее цемент схватывается и твердеет.

Гипс, введенный в состав цемента, связывает часть $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ в нерастворимое соединение гидросульфоалюминат кальция (эттрингит) по реакции:



Это соединение оседает на частицах $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, уменьшая доступ воды к ним, т.е. замедляя скорость реакции гидратации. Обычно гипса вводят при помолу цемента в количестве **3–6 %** или **1,0–3,5 %** в пересчете на SO_3 . Начало схватывания портландцемента должно наступать **не ранее 45 мин**, а конец – **не позднее 12 час** от начала затворения.

Сроки схватывания цемента определяются на приборе Вика при погружении иглы в цементное тесто нормальной густоты. При определении сроков схватывания пестик в приборе Вика (**рис.3**) заменяют иглой (**рис.3,в**).

Диаметр иглы составляет $d=1,1 \pm 0,04$ мм, а длина – $l = 50$ мм. Диаметр закрепляемой части иглы $d = 5$ мм, а длина $l_1 = 14$ мм. Игла изготавливается из стальной жесткой нержавеющей проволоки и весит $7,5 \pm 0,5$ г. На площадку накладывается дополнительный груз $27,5 \pm 0,5$ г., общий вес стержня при испытаниях составляет 300 ± 2 г.

4.2. Методика выполнения лабораторной работы

Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:

1. Портландцемент.
2. Сушильный шкаф.
3. Весы электронные.
4. Мерный цилиндр.
5. Чашка для затворения цементного теста.
6. Лопатка для перемешивания цементного теста.
7. Секундомер.
8. Прибор Вика с иглой.

Проведение испытания:

Для определения *сроков схватывания* цемента готовят цементное тесто нормальной густоты и укладывают его в кольцо прибора Вика. Для приготовления теста отвешивают **400 г** цемента и отмеряют воду в количестве, соответствующем нормальной густоте цементного теста. Цемент равномерно распределяют совком по чашке и на него выливают воду, засекая время по секундомеру. Цемент перемешивают с водой в течение **5 мин** после затворения водой, затем цементное тесто вынимают из чашки шпателем (имеющим закругление по профилю чаши) и укладывают в кольцо для определения сроков схватывания. Иглу прибора доводят до соприкосновения с поверхностью теста, стержень закрепляют винтом, после чего, отвинчивая винт, освобождают стержень и дают игле свободно погружаться в тесто. В начале опыта, пока тесто настолько жидкое, что можно опасаться сильного удара иглы о пластинку, иглу при погружении следует слегка задерживать; как только тесто загустеет, игле дают свободно опускаться. Иглу погружают в тесто через каждые **5 мин** от начала затворения цемента водой до начала схватывания и с промежутками в **15 мин** после достижения начала схватывания; при этом кольцо прибора Вика каждый раз передвигают для того, чтобы игла попадала в разные места. При извлечении иглы из теста ее следует вытирать.

Началом схватывания цементного теста считается время, прошедшее от начала затворения (момент приливания воды) до того момента, когда игла не будет доходить до пластины на **1...2 мм**. **Концом схватывания** цементного теста считается время от начала затворения до момента, когда игла будет опускаться в тесто не более чем на **1 мм**.

Вывод по работе. По результатам эксперимента приводятся данные о сроках схватывания цемента и сравнение с данными **табл.6-7**.

Таблица 6. Сроки схватывания различных цементов

Вид цемента	Схватывание	
	Начало, не ранее	Конец, не позднее
Портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый ПЦ	45 мин	12 ч
Белый портландцемент	45 мин	10 ч
Тампонажный портландцемент:		
- для «холодных» скважин	2 ч	10 ч
- для «горячих» скважин	1 ч 45 мин	4 ч 30 м
Портландцемент для асбестоцементных изделий	1 ч 30 мин	12 ч
Глиноземистый цемент	30 мин	12 ч
Кислотоупорный кварцевый кремнефтористый цемент:		
- для замазок	40 мин	8 ч
- для растворов и бетонов	20 мин	

Таблица 7. Требования ГОСТ 31108–2020 к срокам схватывания цементов

Класс прочности цемента	Начало схватывания, мин, не ранее	Конец схватывания
32,5 М	60	Не нормируется
32,5 Н		
32,5 Б		
42,5 М	50	
42,5 Н		
42,5 Б		
52,5 М	40	
52,5 Н		
52,5 Б		

Примечание: по ГОСТ 31108–2020 *начало схватывания* – время от начала затворения цемента водой до момента, когда *длинная* игла при проникновении в цементное тесто не доходит до пластинки на **3...5 мм**. *Конец схватывания* – время от начала затворения цемента водой до момента, когда *короткая* игла проникает в цементное тесто не более чем на **0,5 мм**.

Лабораторная работа № 5

Определение равномерности изменения объема при твердении цемента

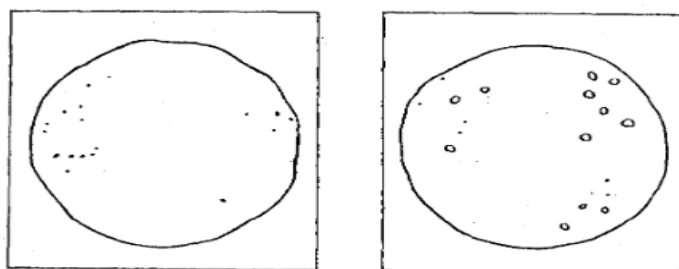
5.1. Краткие теоретические сведения

При твердении вяжущих веществ всегда имеет место некоторое изменение их объема. Если изменение объема сравнительно невелико и протекает равномерно, то оно не вызывает вредных последствий в виде появления трещин или разрушений (**рис.4,а**).

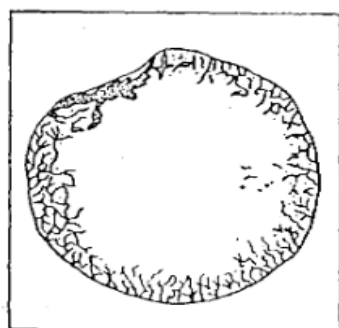
Неравномерность изменения объема может быть вызвана избытком в цементе свободных оксидов кальция и магния или гипса. Неравномерность изменения объема, вызываемая присутствием в портландцементе свободного оксида кальция, может быть обнаружена при стандартных испытаниях кипячением. Вредное же влияние гипса сказывается только при хранении лепешек в холодной воде. Для выявления неравномерности изменения объема, вызываемого оксидом магния производят автоклавные испытания цемента.

Если же изменение объема вызывает значительные внутренние напряжения, которым не может сопротивляться твердеющий цемент, то такой цемент нельзя применять в строительстве (**рис.4,б**). Иногда в первые сутки после изготовления лепешек на них появляются трещины усыхания, не достигающие до краев. Эти трещины не являются признаком недоброкачества цемента при условии, если на обратной стороне нет радиальных трещин, достигающих до краев (**рис.4,в**), и лепешки при постукивании одна о другую издадут звонкий

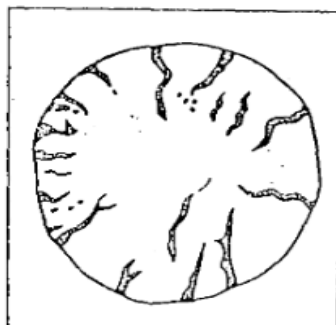
звук. Иногда на лепешках, выдержавших испытание кипячением и пролежавших затем некоторое время на воздухе, появляются радиальные трещины, которые являются результатом усадочных явлений и поэтому также не могут служить признаком недоброкачества цемента.



а - лепешки, **выдержавшие** испытания на равномерность изменения объема



Разрушение

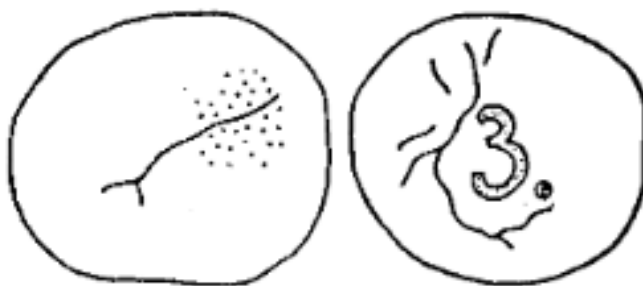


Радиальные трещины



Искривление

б - лепешки, **не выдержавшие** испытания на равномерность изменения объема



Трещины усыхания

в - лепешки, **выдержавшие** испытания на равномерность изменения объема

Рис.4. Внешний вид цементных образцов после испытаний на равномерность изменения объема при твердении

5.2. Методика выполнения лабораторной работы

Испытание портландцемента на равномерность изменения объема при твердении проводят кипячением образцов-лепешек. Методика выполнения работы включает приготовление цементного теста, формование образцов-лепешек и их выдержку в течение **24 часов** в ванне с гидравлическим затвором, затем кипячение образцов.

Приборы и материалы для выполнения лабораторной работы:

1. Портландцемент.
2. Сушильный шкаф.
3. Весы электронные.
4. Мерный цилиндр.
5. Чашка для затворения цементного теста.
6. Лопатка для перемешивания цементного теста.
7. Секундомер.
8. Ванна с гидравлическим затвором.
9. Бачок для испытаний кипячением или пропариванием.
10. Нагревательный прибор.
11. Лупа, металлическая линейка.

Проведение испытания:

Для испытания равномерности изменения объема (постоянства объема) гидравлических вяжущих веществ изготавливают тесто нормальной густоты, отвешивают четыре навески цементного теста по **75 г** и каждую навеску в виде шарика помещают на стеклянную пластинку, предварительно протертую машинным маслом. Затем пластинки встряхивают, ударяя их об стол, до превращения шариков в лепешки *диаметром 7–8 см* и *толщиной* в середине *около 1 см*. Для получения острых краев и гладкой закругленной поверхности лепешек их приглаживают от наружных краев к центру смоченным водой ножом. Приготовленные лепешки предварительно твердеют в ванне с гидравлическим затвором из оцинкованного железа в течение **24±2 час** с момента изготовления. В ванне образцы размещают на решетке, под которой всегда должна быть вода, по периметру ванны имеются канавки, которые должны быть заполнены водой для обеспечения гидравлического затвора. После этого лепешки испытывают на равномерность изменения объема при кипячении.

Для испытания кипячением рекомендуется применять специальный бачок, который нагревают на электрической плитке или другом нагревательном

приборе. Внутри бачка помещают съемную решетчатую полку, расположенную на расстоянии не менее **2 см** от дна бачка. Уровень воды в бачке должен перекрывать лепешки на **4–6 см**. При испытании кипячением лепешки снимают с пластинок через сутки после изготовления и помещают в бачок с водой на решетку, находящуюся в воде. Затем воду в бачке нагревают до кипения и поддерживают его в течение **4 ч**, после чего лепешки оставляют остывать в бачке до температуры помещения. Сразу же после остывания лепешки осматривают.

Цемент признается удовлетворяющим требованию равномерности изменения объема в случае, если на лицевой стороне лепешек, подвергнутых испытаниям, не обнаружится радиальных, доходящих до краев трещин или сетки мелких трещин, видимых в лупу или невооруженным глазом, а также каких-либо искривлений (**рис.4**). Наличие искривлений устанавливают три помощи линейки, прикладываемой к плоской поверхности лепешки.

Вывод по работе. При осмотре лепешек делают вывод о наличии или отсутствии радиальных трещин на образцах и о пригодности цемента по этому показателю.

***Примечание:** для некоторых гидравлических вяжущих веществ стандартами предусмотрены известные отклонения от описанной методики испытания на равномерность изменения объема. Так, при испытании на равномерность изменения объема известково-пуццолановых вяжущих и романцемента лепешки перед испытанием выдерживают во влажной среде не **1 сут.**, а **7 сут.** При испытании глиноземистого цемента лепешки первые **6 ч** после изготовления выдерживают во влажной среде в ванне с гидравлическим затвором при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$, после чего их погружают в воду и хранят в ней при той же температуре. Через 24 ± 2 ч с момента изготовления лепешки подвергают испытанию кипячением.*

*Равномерность изменения объема некоторых вяжущих веществ испытывают, подвергая лепешки обработке паром. При этом в бачок помещают этажерку с двумя решетчатыми полками, из которых нижняя находится в воде, а верхняя выше уровня воды не менее чем на **3 см**. Нижняя полка предназначена для кипячения образцов, а верхняя — для испытания их паром. Некоторые вяжущие испытывают путем выдерживания образцов в холодной воде в течение **27 сут.***

Лабораторная работа № 6

Ускоренное определение марочной прочности цемента

6.1. Краткие теоретические сведения

Марки многих вяжущих веществ определяются в соответствии с пределом прочности их при сжатии через **28 сут.** Однако чтобы избежать задержки материалов на складах заводов-поставщиков, для определения марочной прочности цементов целесообразно использовать различные ускоренные

методы. Эти методы также полезны и для потребителей цемента: заводов сборных железобетонных деталей и строек. Все эти методы основаны на ускоренном твердении при различных режимах тепловлажностной обработки и атмосферном давлении (пропаривании) или на маркировке цемента по результатам **3 и 7 суточных** испытаний. В отдельных способах изменяется состав раствора, размер образцов, способ укладки раствора в формы и т. д.

Все ускоренные методы определения прочности цемента, основанные на применении тепловлажностного (пропарочного) режима твердения, можно разделить на две группы. В основу первой группы положен переходный коэффициент, который определяют при параллельном испытании цемента по ускоренному и стандартному методам и который используют затем при определении марки цемента. Метод ускоренных испытаний должен быть строго определенным, коэффициент же при значительных изменениях в производственном процессе может быть изменен.

Другая группа методов основана на разработке такого режима тепловлажностного твердения и способа изготовления образцов, при которых полученные результаты совпадают или близки к результатам, полученным при стандартных испытаниях. В этом случае переходный коэффициент не используют, так как он равен или близок к единице. При существенном изменении технологии производства (значительное изменение состава сырьевой смеси, топливной шихты и т.д.) может возникнуть необходимость в изменении самого ускоренного метода с тем, чтобы он в изменившихся условиях давал снова результаты, близкие к получаемым по стандартному методу, и, следовательно, не возникло бы необходимости в использовании переходного коэффициента.

Во временных технических условиях на ускоренное испытание портландцементов по методу **ЦНИИПС-2**, разработанному И.М. Френкелем, предусмотрено ускоренное определение активности цемента и бетона. Метод предусматривает испытание в цементном тесте состава **1:0** на образцах-кубиках **2х2х2 см**, которые после **20 ч** хранения во влажной среде пропаривают в течение **4 ч**. Параллельно такие же образцы хранят в формах в воде при обычной температуре. По отношению суточной прочности пропаренных образцов к суточной прочности образцов, твердевших при обычной температуре, устанавливают переходный коэффициент от ускоренного испытания к обычному.

Проведение испытания:

При определении марки цемента отвешивают **200 г** цемента и затворяют его таким количеством воды, которое определяется нормальной густотой по

стандарту. Смесь перемешивают фарфоровой или металлической ложкой, энергично растирая массу в течение **5 мин**, в результате чего получают равномерно перемешанное тесто. Каждую из двух форм, имеющих по шести ячеек кубической формы с размером ребра **2 см**, заполняют тестом и производят его штыкование в каждой ячейке, протыкая **10 раз** тесто проволочным стержнем диаметром **3–4 мм** и ведя штыкование по периметру ячейки спирально к ее центру. Затем каждую форму устанавливают на встряхивающий столик и встряхивают **25 раз**, после чего каждую форму закрывают крышкой и завинчивают крепящие ее болты. Обе формы с тестом помещают во влажную среду при температуре **20±2 °С**. Через **20 ч** кубики из форм извлекают и ставят в бачок для кипячения на полку, расположенную выше уровня воды, после чего воду в бачке подогревают. Когда вода в бачке будет доведена до кипения, образцы пропаривают в течение **4 ч**, затем кубики извлекают из бачка и остужают при комнатной температуре в течение **1 ч**. Затем кубики извлекают из бачка, измеряют, взвешивают и испытывают их на сжатие. Одновременно с этим из другой формы извлекают кубики, хранившиеся во влажной среде при температуре **20±2 °С**, которые после обмера и взвешивания также испытывают на сжатие. Испытание проводят на прессе небольшой мощности (до **6–10 тс**), дающем возможность создавать рост напряжения в испытуемом кубике не более чем в **2–3 кгс/см²** в **1 сек**. Снизу и сверху образца накладывают прокладки из тонкого картона, а кубик укладывают на одну из боковых граней так, чтобы направление разрушающего усилия было параллельно слою укладки. Образец центрируют относительно направления сжимающего усилия и проводят испытание.

Для каждой серии из шести кубиков вычисляют среднее значение прочности при сжатии из четырех наибольших результатов.

Из средних значений прочности пропаренных кубиков ($R_{сут. проп}$) и непропаренных ($R_{сут. норм}$) определяют значение коэффициента n :

$$n = R_{сут. проп} / R_{сут. норм}, \quad (9)$$

в соответствии с которым по графику (**рис.5**) определяют значение переходного коэффициента K от ускоренного испытания к стандартному.

Приближенное значение активности или марки цемента по результатам ускоренного испытания определяют по формуле:

$$A_u = K \cdot R_{сут. проп}, \text{ кгс/см}^2 \text{ (МПа)}. \quad (10)$$

Основным недостатком ускоренного метода испытания цемента является отсутствие точных указаний в отношении режима пропаривания. Поэтому

необходимо использовать пропарочную камеру с автоматическим регулированием режима пропаривания (подъем температуры, выдержка ее при заданной температуре и снижение температуры). В противном случае режимы пропаривания могут значительно отличаться друг от друга, что отрицательно скажется на стабильности проводимых испытаний.

Выводы по работе. По результатам выполненной работы делается вывод об активности или марке исследованного цемента.

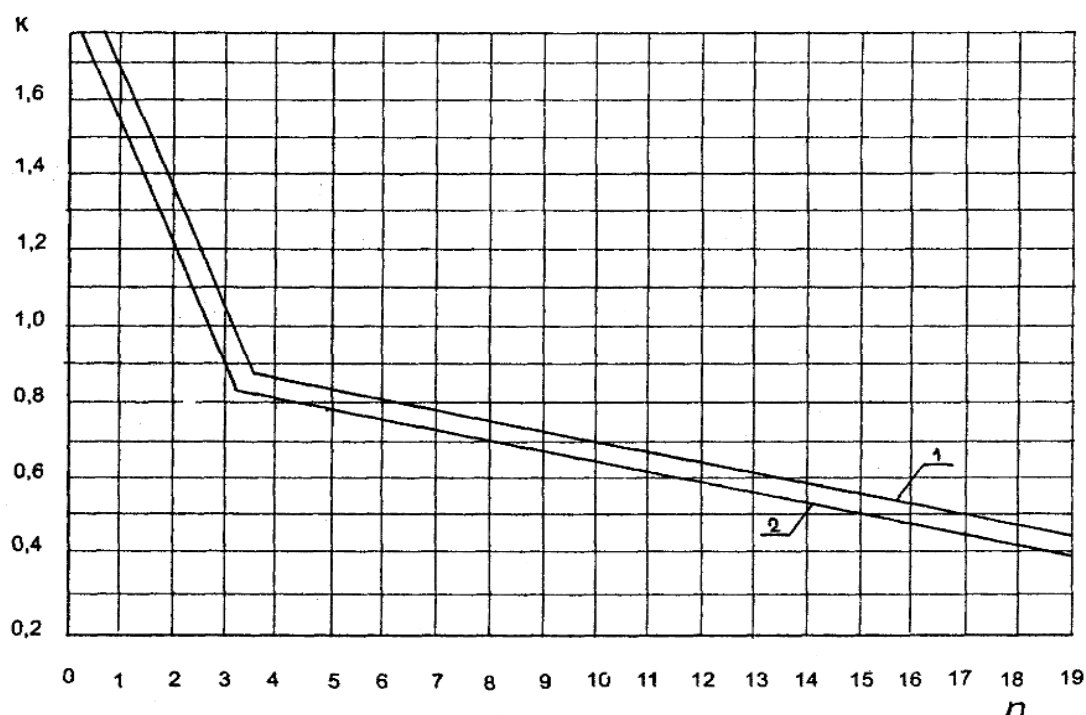


Рис.5. Значения переходного коэффициента при испытании цемента по методу ЦНИИПС-2:

1 – для портландцемента, 2 – для шлакопортландцемента.

Вопросы к коллоквиуму:

1. Портландцемент. Определение;
2. Классификация цементов по марке;
3. Основные строительно-технические свойства цемента;
4. Виды природного сырья для производства портландцемента;
5. Техногенные сырьевые материалы для производства портландцемента;
6. Способы производства цемента;
7. Химический состав цемента;
8. Минералогический состав портландцемента;
9. Добавки для производства цемента;
10. Назначение гипса в составе портландцемента;
11. Химические реакции гидратации минералов клинкера;
12. Сущность методик определения свойств цемента:
 - насыпной объемной плотности,
 - тонины помола,
 - удельной поверхности,
 - нормальной густоты;
 - сроков схватывания,
 - равномерности изменения объема при твердении,
 - марки (ускоренным методом).
13. Технологические параметры, влияющие на водопотребность цемента;
14. Технологические параметры, влияющие на сроки схватывания цемента;
15. Технологические параметры, влияющие на равномерности изменения объема при твердении цемента;
16. Технологические параметры, влияющие на прочностные характеристики цемента, его марку;
17. Основные технологические стадии производства цемента;
18. Тепловые агрегаты, используемые для получения цемента;
19. Разновидности цементов.

Литература:

1. Дидеров И.Г., Матвеев Г. М., Суханова В.Б. Общая технология силикатов. – М.: Стройиздат, 1987. – 559 с.
2. Бутт Ю.М. и др. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
3. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
4. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия.
5. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия.
6. Горшков В.С.. Методы физико-химического анализа вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
7. Кузнецова Т.В. и др. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
8. Бутт Ю.М. и др. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. – М.: Стройиздат, 1973. – 502 с.
9. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986. – 463 с.
10. Колбасов В.М. и др. Технология вяжущих материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 433 с.
11. Капустин Ф.Л. Химия минеральных вяжущих материалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 123 с.
12. Усов Б. А. Химия и технология цемента. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 156 с.
13. Таймасов Б.Т., Классен В.К.. Химическая технология вяжущих материалов: учебник. 2-е изд., доп. – Шимкент-Белгород, 2017. – 448 с.
14. Химическая технология вяжущих материалов: учебное пособие [Электронный ресурс] / В. Н. Смирнская, С. А. Антипина, С. Н. Соколова; Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 200 с.
15. Лотов В.А. Технология материалов на основе силикатных дисперсных систем. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 202 с.

Учебное издание

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной
работы по курсу «**Общая технология силикатов**»
для студентов направления подготовки **бакалавров**
18.03.01 Химическая технология

Составители

Смиренская Вера Николаевна
Сударев Евгений Александрович

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

Подписано к печати 21.06.2025. 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