

И. А. КИРЪЕНКО  
ИНЖЕНЕРЪ-СТРОИТЕЛЬ  
ПРЕПОДАВАТ. КІЕВСК. ПОЛИ-  
ТЕХНИЧЕСКАГО ИНСТИТУТА.

693

К-43

# БЕТОННЫЯ РАБОТЫ НА МОРОЗЪ.

СЪ 37 ФИГУРАМИ И 42 ТАБЛИЦАМИ ВЪ ТЕКСТЪ.

2400  
ПЕРВОЕ ИЗДАНИЕ  
ИНСТИТУТЪ ВЪ КИЕВѢ



Л о

Г. КІЕВЪ  
1919 г.

2200

У 693  
К-43

И. А. КИРЪЕНКО

Инженер-строитель

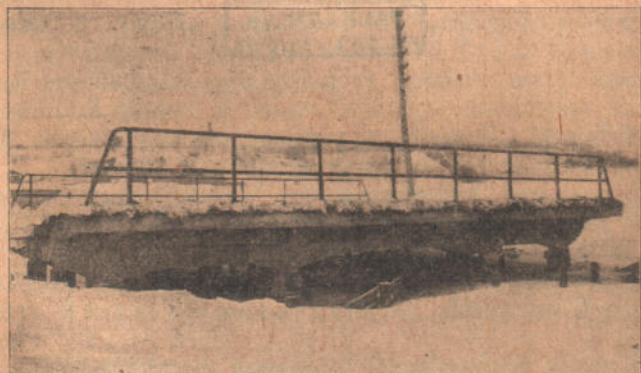
Преподаватель Киевского Политехнического Института.

\*\*\*\*\*

*Глубокоуважаемому Александру  
Павловичу Артемьевичу от автора  
И. Кирьенко 1920/19*

# БЕТОННЫЕ РАБОТЫ НА МОРОЗЪ.

2200  
Библ. № 4088  
Институт. в Киев



проверено  
1960 г.

Г. КИЕВЪ.

И



1918 г.



DRUKARNIA  
POLSKA w KŁOBUCKU

1913

1913

## Предисловіе.

Опытъ производства бетонныхъ работъ на морозѣ произведенъ мною въ первый разъ въ 1910 году въ Таращанскомъ Земствѣ Кіевской губерніи. Внезапно наступившіе морозы захватили работы по устройству двухсаженнаго желѣзобетоннаго моста въ періодъ бетонирования (реберъ) балокъ. Не желая откладывать до весны съ трудомъ организованныя работы, я рискнулъ вести ихъ на морозѣ. Подогрѣвались вода и песокъ. Мостъ былъ сдѣланъ при средней температурѣ ( $-5^{\circ}\text{R}$ ). Подмости были сняты лишь въ маѣ слѣдующаго года. Испытаніе дало хорошіе результаты. За первымъ опытомъ послѣдовали другіе. Въ 1911 году на морозѣ были сдѣланы: желѣзобетонная труба, три желѣзобетонныхъ лотка для укрѣпленія овраговъ<sup>1)</sup> и нѣсколько мелкихъ сооружений.

Продолженіе дальнѣйшихъ опытовъ бетонирования на морозѣ произведено мною въ 1915 г. на военныхъ работахъ при постройкѣ подъѣздныхъ путей у г. Кіева. На военной дорогѣ «Деміевка-Осокорки-Дарница» у Лысой горы сдѣланы на морозѣ желѣзобетонныя сооружения: дорожная труба и лотокъ для спуска воды изъ отводной канавы въ ручей. Работы производились на морозахъ, доходившихъ до  $5^{\circ}$ — $6^{\circ}\text{R}$ . Перечисленные опыты носили скорѣе случайный характеръ и были сопряжены съ рискомъ, хотя уже была нѣкоторая увѣренность въ положительныхъ результатахъ.

Систематически и широко поставлены были бетонныя работы на морозѣ въ 1916—1917 г.г. при постройкѣ «Правобережной Стратегической Дороги» у г. Кіева, идущей отъ Николаевского спуска къ Цѣпному мосту вдоль р. Днѣпра до соединенія съ Деміевской дорогой у Лысой Горы, съ переходомъ жел.-бет. виадукомъ черезъ пути М. К. Воронежской жел. дороги у ст. Кіевъ III. Бывшій Главнокомандующій Ю. З. фронтомъ Н. І. Ивановъ выразилъ желаніе, чтобы искусственныя дорожныя сооружения на этой дорогѣ были сдѣланы изъ долговѣчнаго матеріала, такъ какъ дорога имѣетъ важное значеніе не столько съ стратегической точки зрѣнія, сколько съ точки зрѣнія городского благоустройства при развитіи г. Кіева. Эта дорога является частью кольца, охватывающаго половину Кіева: Крещатикъ, Александровская улица, Набережная къ Цѣпному Мосту, Правобережная Дорога, Деміевская Дорога, Васильковская улица, Крещатикъ.

Назначенный Завѣдывающимъ постройкой Правобережной дороги Инженеръ С. М. Лепешинскій пригласилъ меня для проектированія и постройки искусственныхъ сооружений и предоставилъ самую широкую инициативу въ организаціи работъ. Условія проектированія и выполненія работъ были исключительно трудныя. Дорога проходитъ по берегу Днѣпра у подошвы Кіевскихъ горъ. Геологическія напластованія грунта весьма измѣнчивы: то сырая глина, то пльвуны, то оползни, то иль, то бурая глина — усложняли проектированіе, съ другой стороны требованія Ставки объ ускореніи работъ — все заставляло напрягать энергію до послѣдней степени.

Старшій техничскій персоналъ былъ сьорганизованъ почти исключительно изъ студентовъ Политехническаго Института.

Были спроектированы и выстроены слѣдующія сооружения: 24 трубы малыхъ диаметровъ, 2 большихъ эллиптическихъ трубы, 2 моста, изъ которыхъ виадукъ имѣетъ

<sup>1)</sup> См. И. Кирѣенко. Укрѣпленіе овраговъ желѣзобетонными сооружениями. Петербургъ, 1913 г.

около 100 куб. саж. бетонной кладки, 5 железобетонных лотков для спуска воды къ сооружениямъ и около 20 малыхъ сооружений. Всего было сдѣлано 200 съ лишнимъ куб. саж. бетонной кладки, изъ нихъ на морозѣ до 20 куб. саж.

Вслѣдствіе снѣжности, работы велись непрерывно круглый годъ. Всѣ работы сопровождались экспериментальнымъ изслѣдованіемъ бетона. Испытаніе образцовъ: кубиковъ, пробныхъ балочекъ Эмпергера, колоннъ, звеньевъ трубъ и пр., производились въ Механической Лабораторіи Политехническаго Института Завѣдывающимъ Лабораторіей проф. К. К. Симинскимъ, любезно согласившимся лично вести всѣ испытанія. Параллельно съ опытами на линіи, мной велись дома опыты съ подогрѣтыми матеріалами. Съ наступленіемъ морозовъ были поставлены опыты бетонированія на морозѣ въ широкомъ масштабѣ уже съ увѣренностью въ благопріятныхъ результатахъ: такъ бетонировались на морозѣ нѣкоторыя колонны виадука, — сооружения стоимостью до 200 тысячъ рублей.

Въ высшей степени сочувственно относился къ дѣлу Начальникъ Бѣвскаго Округа Путей Сообщенія, Инженеръ Н. В. Поповъ, смѣло разрѣшая на свой рискъ бетонныя работы на морозѣ, вопреки Министерскимъ техническимъ условіямъ, гдѣ категорически предписывается: «при температурѣ же ниже 0° веденіе работъ на открытомъ воздухѣ безусловно воспрещается»<sup>1)</sup>.

Первоначальныя техническія обоснованія возможности производства бетонныхъ работъ на морозѣ постепенно пополнялись и расширялись благодаря широкой постановкѣ дѣла.

Настоящій трудъ въ цѣляхъ удобства изложенія разбитъ на двѣ части.

Первая часть — общія физическія свойства бетона — содержитъ собранныя въ русской и иностранной литературѣ краткія свѣдѣнія, освѣщающія физическую и химическую природу бетона.

Во второй части изложены теоретическія соображенія о возможности производства бетонныхъ работъ на морозѣ. Соображенія эти подтверждены рядомъ лабораторныхъ опытовъ и данными изъ практики.

Можетъ быть мои теоретическія соображенія страдаютъ односторонностью и увлеченіями, можетъ быть лабораторныя опыты малочисленны, но фактъ постройки железобетонныхъ сооружений на морозѣ съ высокимъ качествомъ бетона остается неопровержимымъ. Вотъ уже два года сооружения существуютъ и никакихъ дефектовъ въ бетонѣ не замѣчено. Моимъ скромнымъ желаніемъ въ настоящемъ трудѣ было стремленіе сдвинуть съ мертвой точки вопросъ о бетонныхъ работахъ на морозѣ. Если не вѣрна моя теорія, то пусть другіе подведутъ подъ совершившійся фактъ научный фундаментъ.

Считаю своимъ искреннимъ долгомъ выразить мою глубокую благодарность слѣдующимъ лицамъ. Инженеру Н. В. Попову, давшему мнѣ возможность поставить опыты въ широкомъ масштабѣ и много помогавшему своими совѣтами. Инженеру С. М. Лепешинскому, всегда содѣйствовавшему успѣху дѣла.

Многоуважаемымъ профессорамъ: К. К. Симинскому лично производившему испытанія образцовъ въ Механической Лабораторіи Института, Н. А. Вѣлелюбскому, С. П. Тимошенко, Д. А. Чернобаеву и В. Н. Чирвинскому, давшимъ многія цѣнныя указанія. Преподавателю Института В. Г. Леонтовичу, указавшему многія цѣнныя источники по затронутому мною вопросу.

Выражаю глубокую благодарность моимъ помощникамъ по работѣ — студентамъ Политехническаго Института: П. А. Виноградову, И. Г. Кожухову, Л. С. Левину, И. П. Разсказову, А. Ф. Циммерману и М. В. Шгепану, особенно послѣднему, который ревностно отдался дѣлу, поселившись на самой постройкѣ и неотлучно проживъ тамъ все время работъ.

Въ теченіе работъ Л. С. Левинъ, М. В. Шгепанъ, и И. Г. Кожуховъ окончили институтъ и уже въ званіи инженеровъ продолжали нашу общую работу.

Января 1919 г.

И. Кирьенко.

<sup>1)</sup> Приложение I къ приказу по Министерству Путей Сообщенія отъ 2 марта 1911 г. № 51. „Техническія условія для железобетонныхъ сооружений § 12“.

# Часть I. Общія физическія свойства бетона.

## ГЛАВА I. Петрографія цементнаго клинкера.

### § 1. Минералы цементнаго клинкера и отвердѣвшаго цемента.

Строго установленной, вполне опредѣленной, ясной и незыблемой теоріи твердѣнія растворовъ портландъ-цемента въ настоящее время нѣтъ. Также и искусство цементнаго производства до сихъ поръ не имѣетъ полной ясности и строгой научной обоснованности.

„Можно съ увѣренностью сказать, что даже въ настоящее время искусство цементнаго производства является мало понятнымъ“. <sup>1)</sup> Такъ писалъ Кюммингъ въ 1897 года. Прошло 20 лѣтъ съ тѣхъ поръ а сказанное имъ остается справедливымъ и по настоящее время. Нѣтъ также строго установленного понятія и о строеніи портландъ-цемента, невыяснены и причины отвердѣванія растворовъ.

Это обстоятельство, повидимому можно приписать тому, что почти всѣ научныя изслѣдованія, произведенныя въ этомъ направленіи, носили чисто химическій характеръ, тогда какъ портландъ-цементный клинкеръ не представляетъ собой чисто химическаго продукта, а скорѣе, подобно естественнымъ сложнымъ породамъ, какъ то — гранитъ, гнейсъ, и друг. является конгломератомъ отдѣльныхъ минераловъ, но только искусственнаго происхожденія, представляетъ, такъ сказать, искусственную горную породу.

При изученіи естественной горной породы въ настоящее время кромѣ химическихъ методовъ, необходимо и обязательно примѣненіе микроскопа. То же должно было бы быть и при изученіи искусственной горной породы.

Нѣкоторые нѣмецкіе ученые пробовали примѣнять микроскопъ при изслѣдованіи цемента, но это дѣлалось между прочимъ. По традиціи главное значеніе при изслѣдованіи придавалось химическимъ методамъ. Первый примѣнившій строго научный комбинированный химико-петрографическій приемъ къ изученію портландскаго цемента былъ французскій ученый проф. Лешателье, который въ началѣ 80-хъ годовъ, далъ теорію тверденія портландъ-цементныхъ растворовъ и первый пролилъ нѣкоторый свѣтъ на строеніе цементнаго клинкера. Теорія Лешателье, раздѣляется и по настоящее время многими учеными.

Лешателье первый при своихъ изслѣдованіяхъ портландскаго цемента обратилъ особенное вниманіе на его петрографію и произвелъ тщательное изслѣдованіе съ этой точки зрѣнія.

Лешателье самъ объединилъ полученные имъ результаты относительно минералогическаго состава цементнаго клинкера слѣдующимъ образомъ.

Въ цементномъ клинкерѣ имъ найдены:

1. Безцвѣтные кристаллы со слабого двупреломляемостію; ихъ четырехъ и шестиугольныя сѣченія напоминаютъ такія же сѣченія куба. При дальнѣйшемъ эта составная часть является преобладающею.

2. Вещество, выполняющее промежутки между кристаллами, постоянно; темный цвѣтъ его измѣняется между желтовато-краснымъ и зеленовато-бурымъ. Это вещество

<sup>1)</sup> Ю. Кюммингъ. Американскіе цементы. 1897 г. стр. 10.

обладает болѣе сильною двояко-преломляемостью, нежели предыдущее, но оно не обладает кристаллическими очертаніями.

3. Рядомъ съ этими общими существенными составными частями часто находятся второстепенныя, которыя различны въ различныхъ пробахъ:

а) Кристаллическія сѣченія, которыя по формѣ и по величинѣ аналогичны вышеупомянутымъ, но отличаются отъ нихъ желтоватымъ цвѣтомъ и непрозрачностью; также тонкими штрихами, которыя взаимно наклонены подъ угломъ, близкимъ 60 градусамъ.

б) Очень маленькіе кристаллы, которые обладают двоякою преломляемостью въ степени достаточной для того, чтобы обнаруживать поляризационные цвѣта. Эта составная часть является спорадически и часто совершенно исчезаетъ. Она является главнымъ образомъ въ клинкерѣ недостаточно обожженномъ.

в) Части, не дѣйствующія на поляризованный свѣтъ, — отрицательный признакъ, не имѣющій опредѣленнаго значенія.

Петрографическая часть работы Лешателье по изученію цементовъ, повидимому, мало обратила вниманія на себя ученыхъ, и осталась какъ то въ тѣни, тогда какъ его химическія воззрѣнія господствуютъ въ цементной литературѣ и до настоящаго времени.

Вторымъ послѣ Лешателье ученымъ, производившимъ изученіе порландскаго цемента при помощи петрографическаго метода, былъ шведскій ученый Тернебомъ<sup>1)</sup>. Спустя приблизительно 10 лѣтъ послѣ Лешателье Тернебомъ по порученію Общества скандинавскихъ фабрикантовъ, не будучи вначалѣ даже знакомъ съ работами Лешателье, произвелъ детальное изученіе цементныхъ клинкеровъ и отвердѣннаго цементнаго раствора.

Наблюдая подъ микроскопомъ тонкія пластинки (шлифы) нормальнаго цементнаго клинкера, Тернебомъ опредѣлилъ, что составныя ихъ части имѣютъ кристаллическій характеръ, и ихъ можно охарактеризовать, какъ искусственные минералы.

При чемъ не всѣ пробы обладаютъ совершенно одною и тою же природою: какъ минеральный составъ, такъ и кристаллическія выдѣленія въ разныхъ образцахъ весьма варьируютъ между собою. Какъ точка опоры для изученія Тернебомомъ были взяты такіе образцы, въ которыхъ кристаллическія выдѣленія были особенно хороши.

Въ изслѣдованныхъ образцахъ Тернебомъ опредѣлилъ настолько индивидуализированные минералы, что онъ даже далъ каждому отдѣльныя названія: алить, белить, селить и фелить.

## Минералы клинкера.

1. Алить. Алить является самой важной изъ составныхъ частей клинкера. Онъ безцвѣтенъ, прелоляетъ свѣтъ довольно сильно, но обладаетъ очень слабою двоякою преломляемостью. Сѣченія шестиугольной формы почти изотропны. Но кристаллизуется въ ромбической системѣ, повидимому, но съ гексагональною внѣшностью.

Пучкообразныя сѣченія часто пронизаны отдѣльными трещинами, которыя направляются параллельно длинѣ волоконъ пучка; поэтому, можно предположить, что минералъ долженъ обладать довольно ясно выраженнымъ направлениемъ спайности. Часто наблюдаются въ минералѣ трещины, которыя взаимно пересѣкаются безъ всякой правильности.

2. Белить. Белить различается по своему грязножелтому, нѣсколько мутному цвѣту. Онъ оптически двуосенъ. Двоякопреломляемость его довольно значительна. Образуетъ зерно округленной формы, безъ ясныхъ кристаллическихъ очертаній. Зерна встрѣчаются то отдѣльно, то группами. Часто они иштрихованы, иногда даже по двумъ направленьямъ, которыя въ зависимости отъ того, какъ проходитъ разрѣзъ, пересѣкаются взаимно подъ разными углами (см. фиг. 1).

3. Селить. Селить легко отличается отъ другихъ минераловъ клинкера своимъ темнымъ желтовато-бурымъ цвѣтомъ. Оптически двуосенъ, обладаетъ сильною двоякопреломляемостью; принадлежитъ вѣроятно къ ромбической системѣ. Обладаетъ сильнымъ

<sup>1)</sup> Горный журналъ 1901 г. Т. II, кн. 5. „О петрографіи цементнаго клинкера“ перевелъ С. Глинка.



плеохроизмъ. Иногда образуется въ видѣ маленькихъ палочекъ, что бываетъ въ клинкерѣ слабо обожженномъ. Въ хорошо обожженномъ клинкерѣ онъ появляется, большую

частью, только какъ заполняющее вещество между остальными минералами клинкера, при чемъ онъ распределенъ въ массѣ не равномерно, а въ видѣ пятенъ.

4. Фелитъ. Фелитъ безцвѣтенъ; обладаетъ сильною двойкою преломляемостью; оптически двуосенъ. Его показатель преломленія свѣта почти такой же, какъ и у белита. Образуетъ большую часть круглыхъ зерна. Нерѣдко обнаруживаетъ ясную штриховку, которая, если ясно выражено продольное направление, всегда расположена ему перпендикулярно (см. фиг. 2). По нѣкоторымъ признакамъ минераль, должно быть, ромбической системы.



Фиг. 1. Зерно белита, увеличенное въ 300 разъ.

ствовалъ. Повидимому онъ до нѣкоторой степени замѣщаетъ белитъ. Нерѣдко оба минерала встрѣчаются вмѣстѣ, но при этомъ, когда одинъ изъ нихъ встрѣчается въ большемъ количествѣ, другой обыкновенно исчезаетъ.

5. Изотропная промежуточная масса. Кромѣ этихъ четырехъ описанныхъ минераловъ промежутки между ними заполняетъ изотропная промежуточная масса, стекловатое выдѣленіе. Вещество повидимому аморфно, безцвѣтно, обладаетъ сильнымъ показателемъ преломленія, даже нѣсколько большимъ, чѣмъ у алита. Количество его хотя и незначительное, но во всякомъ случаѣ нельзя считать ничтожнымъ.

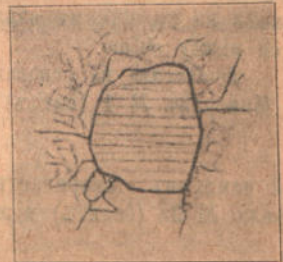
Охарактеризованные здѣсь Тернебомомъ пять составныхъ частей, единственные найденные имъ съ увѣренностью въ нормальномъ клинкерѣ.

Сравнимъ результаты изслѣдованій минералогическаго состава цементнаго клинкера, полученные Тернебомомъ, съ результатами, полученными Лешателье. Въ минералахъ № 1 и № 2 Лешателье, легко распознать алитъ и селитъ — Тернебома. Минераль № 3а безъ сомнѣнія соответствуетъ веществу, заполняющему промежутки между минералами Тернебома и рассматриваемому имъ, какъ стекловидный остатокъ. Рассматривая минераль № 3б. — Лешателье и белитъ, Тернебомъ заключаетъ, что полной тождественности нѣтъ, одинъ и тотъ же это минераль или разные — вопросъ остается открытымъ, что по мнѣнію Тернебома не существенно.

Разсмотримъ дальнѣйшіе выводы Тернебома. Минералы клинкера въ генетическомъ отношеніи слѣдуютъ, повидимому такимъ образомъ: белитъ, фелитъ, алитъ, селитъ, стекло. Эта послѣдовательность имѣетъ только общее значеніе, и вовсе не слѣдуетъ думать, что образованіе одного минерала заканчивается прежде, чѣмъ зарождается образованіе другого. Можно предположить, что образованіе всѣхъ минераловъ происходитъ почти одновременно, но конецъ образованія заканчивается, повидимому въ указанномъ выше порядкѣ.

Разсмотримъ отношеніе минераловъ клинкера къ водѣ. Тернебомъ, произведя многочисленные опыты растворенія цементовъ въ чистой водѣ, въ водѣ съ угольной кислотой и съ различными другими слабыми кислотами, установилъ, что разлагаемость различныхъ минераловъ весьма неодинакова; существуетъ слѣдующая послѣдовательность въ растворимости: алитъ, фелитъ, белитъ, стекло, селитъ.

Чистая вода дѣйствуетъ на алитъ довольно скоро, на остальные минералы только очень медленно. Малое содержаніе угольной кислоты въ водѣ очень сильно повышаетъ



Фиг. 2. Зерно фелита увеличенное въ 300 разъ.

разлагающую силу ея на алитъ. Въ этомъ случаѣ алитъ легко разлагается съ желатинознымъ остаткомъ при выдѣленіи маленькихъ ромбоэдровъ известковаго шпата. На селитѣ и на стекло вода, даже въ присутствіи угольной кислоты, дѣйствуетъ весьма слабо.

Такимъ образомъ, по Тернебому, микроскопическая характеристика минераловъ клинкера, а также ихъ относительная разлагаемость могутъ считаться установленными достаточно опредѣленно.

## § 2. Химическій составъ минераловъ клинкера.

Для болѣе точнаго изученія минераловъ клинкера требуется опредѣлить ихъ химическій составъ. Но въ этомъ отношеніи существуютъ большія затрудненія. Механическому раздѣленію минераловъ клинкера препятствуетъ ихъ мелкозернистость (зерна въ лучшемъ случаѣ достигаютъ 0,10 милим.); раздѣленію химическимъ путемъ препятствуетъ легкая разлагаемость минераловъ.

Наиболѣе возможный способъ для рѣшенія вопроса является способъ синтеза. Съ этой цѣлью была приготовлена «нормальная сырая цементная смѣсь» и былъ произведенъ ея анализъ. Затѣмъ былъ произведенъ рядъ пробныхъ обжиговъ этой «нормальной сырой цементной смѣси» безъ добавокъ и съ добавками къ ней въ различныхъ количествахъ: углекислой извести ( $CaCO_3$ ), глинозема, ( $Al_2O_3$ ), окиси желѣза ( $Fe_2O_3$ ), кремнезема ( $SiO_2$ ), и углекислой магнезій ( $MgCO_3$ ). Пробные обжиги (числомъ до 10) дали образцы, которые были изслѣдованы подъ микроскопомъ для опредѣленія того, какъ измѣняется образованіе минераловъ въ зависимости отъ различныхъ добавокъ. Тернебомъ производившіе эти изслѣдованія, приходятъ къ слѣдующимъ выводамъ.

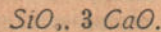
Количество белита прибываетъ съ увеличеніемъ содержанія кремнекислоты ( $SiO_2$ ), нормальная смѣсь, съ добавкою 4% кремнезема, давала клинкеръ, въ которомъ преобладалъ белитъ. Съ увеличеніемъ содержанія извести ( $CaO$ ) оно уменьшается. При добавкѣ 4% углекислой извести, получался клинкеръ, который состоялъ почти только изъ алита и белита. Белитъ въ химическомъ отношеніи отличается отъ алита лишь большимъ содержаніемъ кремнезема ( $SiO_2$ ).

Этотъ выводъ вполне совпадаетъ съ выводами Лешателье, который также дѣлалъ опыты.

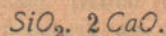
При добавленіи 2 — 5% окиси желѣза ( $Fe_2O_3$ ) къ нормальной смѣси, количество селита въ клинкерѣ весьма существенно увеличивалось. Темный цвѣтъ селита указываетъ, что въ этомъ минералѣ главнымъ образомъ сосредоточивается содержаніе желѣза въ клинкерѣ.

Только что описанные опыты синтеза и полученные результаты дали нѣкоторые намеки на то, какимъ образомъ минералы клинкера въ химическомъ отношеніи различаются между собою.

Лешателье на основаніи своихъ синтетическихъ опытовъ приходитъ къ выводамъ: 1) Минералъ № 1 (алитъ) можетъ быть приблизительно выраженъ формулой



при чемъ онъ оговариваетъ, что «точность этой формулы не доказана абсолютно. 2) Минералъ № 3а (белитъ) можетъ быть приблизительно выраженъ формулой



3) Минералъ № 2 (селитъ) можетъ быть выраженъ формулой —  $2SiO_2, Al_2O_3, 3CaO$ . Тернебомъ находятъ, что формулы Лешателье для алита и белита невѣрны по слѣдующимъ соображеніямъ.

Количество кремневой кислоты ( $SiO_2$ ) въ порландскомъ цементѣ колеблется между 19 и 26% и должно было бы находиться въ предѣлахъ 21 — 24%. Соединенія, полученные Лешателье, содержатъ кремнеземъ въ слѣдующихъ количествахъ:

алитъ — $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . . . . .	26,3%	$\text{SiO}_2$
белитъ — $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . . . . .	34,9%	$\text{SiO}_2$
селитъ — $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ . . . . .	30,8%	$\text{SiO}_2$

Даже первое соединеніе, наиболѣе основное изъ трехъ, содержитъ кремнекислоту въ количествѣ, превышающемъ максимальное содержаніе ея въ клинкерѣ (26,3% > 24%).

Отсюда слѣдуетъ, что главный минералъ клинкера-алитъ долженъ содержать кремнекислоту ( $\text{SiO}_2$ ) менѣе, чѣмъ соединеніе  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Конечно, при условіи, что въ клинкерѣ не находится свободная известь, а въ хорошемъ клинкерѣ ея и не должно быть.

Но болѣе основной силикатъ извести, чѣмъ  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , допустить нельзя, потому что по Гельдту—одинъ эквивалентъ кремнезема можетъ связать самое большое три эквивалента  $\text{CaO}$ .

Такимъ образомъ остается одно—допустить, что алитъ есть двойное соединеніе или же изоморфное смѣшеніе силиката извести и алюмината извести.

Это допущеніе подтверждается опытомъ. Если повысить содержаніе извести въ клинкерѣ, то болѣею частью увеличивается скорость схватыванія цемента. А скорость схватыванія (какъ увидимъ ниже) обуславливается присутствіемъ въ реакціи глинозема. Если это вѣрно, то не вѣрно заключеніе Лешателье, что весь глиноземъ находится въ селитѣ, такъ какъ селитъ совершенно не дѣйствуетъ при явленіи схватыванія. Слѣдовательно часть глинозема, по крайней мѣрѣ, должна входить въ составъ такого активного минерала, какимъ является алитъ.

Если допустить, что известковые алюминаты образуютъ двойныя соединенія съ известковыми силикатами, то представляется весьма возможнымъ, что вслѣдствіе этого могутъ происходить легко разложимыя вещества. А этимъ обстоятельствомъ объясняется, почему цементы, богатые глиноземомъ, принадлежатъ къ скоросхватывающимся.

Всѣ эти теоретическія соображенія Тернебомъ провѣрилъ химическимъ анализомъ. Для анализа онъ попытался получить изъ порошка цементнаго клинкера алитъ въ чистомъ видѣ. Порошокъ для опыта былъ полученъ изъ клинкера пробнаго обжига съ добавленіемъ къ сѣрой массѣ 4% углекислаго кальція. Такой цементъ, какъ ясно изъ предыдущаго, состоялъ почти изъ алита и селита.

Раздѣленіе алита и селита производилось при помощи не дѣйствующаго на цементъ йодистаго метилена. Несмотря на всѣ старанія, полного отдѣленія произвести не удалось и пришлось анализировать алитъ слегка загрязненный селитомъ. Получивъ данныя анализа, Тернебомъ произвелъ подсчетъ количествъ элементовъ сначала по формулѣ Лешателье (т. е. предполагая что весь глиноземъ, а также и вся окись желѣза принадлежатъ селиту), и пришелъ къ результату, что при этомъ условіи селитъ составлялъ бы не менѣе 36,6% взятаго для опыта порошка. Но микроскопъ показалъ, что такого загрязненія быть не могло.

Предполагая же, что порошокъ, взятый для опыта содержитъ 10% селита (загрязненіе алита), и что вся окись желѣза происходитъ изъ селита, Тернебомъ нашелъ, что алитъ долженъ обладать слѣдующимъ составомъ.

Кремнеземъ . . . . .	19,48%
Глиноземъ . . . . .	7,83%
Известь . . . . .	67,60%
Магnezія . . . . .	3,00%
Окись натрія . . . . .	0,90%
Окись калия . . . . .	1,19%
	<hr/>
	100,00%

Здѣсь отношеніе кислорода—съ одной стороны въ кремнеземѣ и глиноземѣ, а съ другой въ основаніяхъ—выражается почти точно 2 : 3.

Отношеніе такое, какъ въ формулѣ Лешателье для алита  $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . [ $\text{O}_2 : 3 \text{O} = 2 : 3$ ]

Но такъ какъ алитъ, какъ уже раньше указывалось, не можетъ быть чистымъ силикатомъ, а долженъ быть разсматриваемъ, какъ соединеніе силиката съ алюминатомъ

и при этомъ сохранять отношеніе кислорода къ основанію 2 : 3, то этотъ аллюминатъ долженъ имѣть формулу  $9 CaO . 2 Al_2O_3$  [ $2.O_3 : 9.O = 6.O : 9.O = 2 : 3$ ]. Аллюминатъ такой основности въ сложномъ соединеніи допустить возможно, такъ какъ Гельдтъ говоритъ: «одинъ эквивалентъ глинозема легко можетъ связать 4 эквивалента извести».

Такимъ образомъ для алита можетъ быть окончательно принята формула:



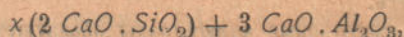
Тернебомъ оговаривается, что эта формула не можетъ быть принята окончательно установленной, такъ какъ выводъ формулы содержитъ въ себѣ много гипотетическаго.

Переходя къ другимъ минераламъ клинкера замѣтимъ, что ни Тернебому, ни позднѣйшимъ изслѣдователямъ не удалось попытки отдѣленія каждаго изъ нихъ изъ общей массы клинкера.

Въ добавленіе къ изслѣдованіямъ Лешателье Тернебомъ, на основаніи своихъ выводовъ, приходитъ къ слѣдующему заключенію о вѣроятномъ составѣ белита и селита.

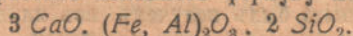
Какъ указывалось раньше, и что совпадаетъ съ мнѣніемъ Лешателье, между белитомъ и алитомъ разница заключается лишь въ основности.

Лешателье принялъ формулу для белита  $2 CaO . SiO_2$ , понизивъ степень основности противъ алита —  $3 CaO . SiO_2$ . Если же алитъ содержитъ глиноземъ, то его долженъ содержать и белитъ. Формула белита по аналогіи съ формулой алита можетъ быть написана такъ



т. е. сохранивъ отношеніе кислорода—съ одной стороны въ кремнеземѣ и глиноземѣ, а съ другой въ основаніяхъ (1 : 1).

Что касается селита, то его темный цвѣтъ указываетъ на высокое содержаніе окиси желѣза. Можно предположить, что окись желѣза играетъ въ селитѣ роль болѣе важную, чѣмъ глиноземъ. Поэтому Тернебомъ измѣняетъ формулу Лешателье для селита такъ



Какъ раньше указывалось, белитъ и фелитъ въ извѣстной степени замѣщаютъ другъ друга. Поэтому, полагаетъ Тернебомъ, составъ фелита не долженъ значительно различаться отъ состава белита. Какая разница между ними въ химическомъ отношеніи—вопросъ не рѣшенъ и до сихъ поръ.

Считаемъ не лишнимъ привести здѣсь наблюденія Тернебома надъ микроскопическимъ строеніемъ цементнаго клинкера и отвердѣвшаго цементнаго раствора съ микрофотографическими снимками изслѣдуемыхъ шлифовъ.

### § 3. Микроскопія цементнаго клинкера и отвердѣвшаго цементнаго раствора.

Клинкеръ, слабо обожженный, образуетъ очень пористую массу, которая главнымъ образомъ состоитъ изъ маленькихъ свѣтлыхъ зеренъ, съ закругленными, какъ бы оплавленными краями (фиг. 3). Между зернами можно различить — зерно алита и белита (или фелита). Можно предположить, что между ними также находятся и зерна окиси кальція.

Селитъ является частью, какъ промежуточная масса, частью какъ самостоятельное вещество въ видѣ палочекъ.

Клинкеръ хорошо обожженный, менѣе пористъ (фиг. 4). Въ немъ кристаллы алита и белита ясно выражены. За то селитъ, является лишь какъ промежуточная масса и распредѣляется часто въ видѣ пятенъ. Это подтверждаетъ правильность выводовъ Лешателье, что кристаллизація минераловъ клинкера происходитъ при температурѣ нѣсколько низшей ихъ температуры плавленія. Наиболѣе легкоплавкоу богатый желѣзомъ селитъ; благодаря этому онъ получаетъ кристаллическую природу ранѣе другихъ минераловъ



клинкера. Когда температура повышается, селитъ дѣлается жидкимъ; благодаря этому и вся масса получаетъ значительную подвижность: она дѣлается менѣе пористою и спекается. Различныя частицы при этомъ приходятъ въ болѣе тѣсное соприкосновеніе между собою; а это обстоятельство главнымъ образомъ содѣйствуетъ образованію алита и белита. Оба эти минерала не доходятъ до плавленія при нормальныхъ условіяхъ, поэтому при охлажденіи расплавленный селитъ занимаетъ промежутки между ними.

Селитъ дѣйствуетъ до нѣкоторой степени, какъ плавленъ, и какъ таковой имѣетъ значеніе для качества цемента, но при твердѣніи цемента онъ никакой роли не играетъ. О селитѣ Лешателье говоритъ: «его единственное назначеніе содѣйствовать, въ качествѣ плавня, во время обжига, соединенію кремнезема съ известью».

Извѣстное свойство нѣкоторыхъ клинкеровъ—разсыпаться въ порошокъ при охлажденіи—какъ это признается многими учеными—основывается на томъ, что при температурѣ обжига образуются соединенія, молекулярное строеніе которыхъ при болѣе низкой температурѣ неустойчиво и обладаетъ стремленіемъ перегруппировываться въ другое строеніе молекулы. Къ такимъ перегруппировкамъ структуры склоненъ белитъ. Этимъ свойствомъ белита объясняется часто наблюдаемое явленіе, что при продолжительномъ обжигѣ получается рассыпающійся въ порошокъ клинкеръ.

Такой же клинкеръ иногда получается и изъ такой сырой массы, изъ которой раньше получался хорошій клинкеръ. Объясненіемъ въ данномъ случаѣ служить загрязненіе клинкера золою кокса при продолжительномъ обжигѣ. При чемъ около каждаго комка клинкера образуется оболочка, состоящая изъ неустойчиваго белита.

Однако не весь белитъ въ одинаковой степени обладаетъ свойствомъ рассыпаться и не въ одинаковой степени содержитъ трещины. Возможно, что однѣ пропорціи изоморфныхъ смѣсей известковаго силиката съ известковымъ аллюминатомъ обладаютъ болѣею молекулярной устойчивостью, чѣмъ другія.

При производствѣ цемента иногда наблюдается такое явленіе, что клинкеръ при остываніи держится, а затѣмъ при дѣйствіи воздуха рассыпается. Это явленіе можно объяснить слабымъ обжигомъ и связаннымъ съ нимъ несовершеннымъ образованіемъ минераловъ. При слабомъ обжигѣ сырой массы въ клинкерѣ остается часть известіи въ свободномъ состояніи. Эта оставшаяся известь гасится при поглощеніи влажности изъ воздуха, благодаря этому пористая масса клинкера рассыпается.

## Затвердѣвшій цементъ

Для микроскопическихъ изслѣдованій затвердѣваго цемента Тернебомомъ были взяты образцы, болѣе 20 лѣтъ находившіеся подъ водой.

При разсмотрѣніи препарата изъ этого цемента (фиг. 5) видна главнымъ образомъ выступающая сѣрая масса, которая лишь въ тонкихъ шлифахъ мѣстами хорошо просвѣчивается; эта масса составляетъ главную массу препарата. На поляризованный свѣтъ она болѣею частью не дѣйствуетъ. Въ этой массѣ частью разсыяны кусочки клинкера и зерна еще не разложившихся минераловъ клинкера, частью здѣсь выступаютъ закругленныя выдѣленія безцвѣтнаго минерала, отчасти чешуйчатого строенія съ незначительнымъ показателемъ преломленія, но съ яркими интерференционными цвѣтами. Этотъ минералъ, очевидно представляетъ собою новообразованіе, которое заполняетъ маленькіе пузырьки въ массѣ цемента. Наблюдаются, какъ бы, миндалевидныя выдѣленія, но микроскопическихъ размѣровъ. Поперечникъ миндалинъ мѣняется въ предѣлахъ отъ 0,10 до 1 миллиметра, въ отдѣльныхъ случаяхъ 2—3 миллиметра. Тотъ же минералъ, который образуетъ миндалины, разсыянъ почти во всей массѣ въ видѣ мелкихъ неправильно образованныхъ включеній.

Намѣненія, которымъ подверглись въ массѣ затвердѣваго цемента отдѣльные минералы клинкера, удобнѣе всего прослѣдить на одиночныхъ зернахъ отдѣльныхъ минераловъ.

На томъ мѣстѣ, гдѣ раньше находилось не слишкомъ мелкое зерно алита, обыкновенно находится теперь зернышко еще совершенно свѣжаго алита, и около этого зернышка наблюдается поле, состоящее изъ прозрачнаго безцвѣтнаго вещества, которое на поляризованный лучъ или совѣтъ не дѣйствуетъ или дѣйствуетъ очень слабо и обладаетъ незначительнымъ показателемъ преломленія.

Такое поле въ ширину имѣетъ обыкновенно 0,005—и до 0,01 миллим.; очевидно оно произошло вслѣдствіе метаморфозы алита (см. фиг. 6). Зернышки алита меньшихъ размѣровъ подверглись полной метаморфозѣ; ихъ первоначальныя очертанія однако удается различить еще довольно хорошо. Продуктъ метаморфозы мельчайшей пыли алита образуетъ по виду однородную массу, которая, заключая въ себѣ въ видѣ мути разсѣянныя частицы остальныхъ минераловъ клинкера, составляетъ сѣрую главную составную часть затвердѣвшаго цемента.



Фиг. 6.

Зерно алита увелич. въ 300 раз.

Зернышки белита, фелита, и селита сохраняютъ вообще совершенно свѣжій видъ и не округлены особымъ полемъ, подобно алиту, даже въ цементахъ болѣе, чѣмъ двадцатилѣтняго возраста. Приведенныя наблюденія подтверждаютъ положеніе Лешателье, что при твердѣніи цемента алитъ представляетъ единственную активную составную часть клинкера. Но тѣ же наблюденія показываютъ также, что и самъ алитъ подвергается лишь поверхностному дѣйствію, потому что при дѣйствіи воды на вещество алита образуется желатинозное выдѣленіе,

которое обволакиваетъ зернышки алита и — если оно достигаетъ извѣстной толщины — предохраняетъ ихъ отъ дальнѣйшаго разложенія.

Этимъ объясняется, почему такъ существенно, при смалываніи цемента, стремиться къ достиженію возможной тонкости помола. Зерно алита въ поперечникѣ болѣе 0,02 миллим. вообще не должно подвергаться полному разложенію. Зерна алита большихъ размѣровъ дѣйствуютъ отчасти только лишь какъ заполняющее вещество, большей частью также дѣйствуютъ зерна остальныхъ минераловъ клинкера. Только тогда, когда на эти крупныя зерна алита дѣйствуетъ вода съ угольной кислотой, то и въ нихъ происходитъ разложеніе съ выдѣленіемъ вяжущихъ веществъ.

Такимъ образомъ твердѣніе цемента обуславливается, по всей вѣроятности, главнымъ образомъ двумя новообразованиями.

1) Одно изъ нихъ кристаллизуется немедленно, образуя безцвѣтныя чешуйки, и должно быть отчасти растворимо въ водѣ, потому что оно всегда заполняетъ пустоты въ цементной массѣ. Это вещество Лешателье опредѣляетъ какъ гидратъ извести.  $[Ca(OH)_2]$ .

Это положеніе подтверждается химическимъ анализомъ затвердѣвшаго цемента.

Приготовленные для этой цѣли кристаллики гидрата окиси кальція Тернебомъ сравнивалъ съ чешуйками новообразованія и получалъ полное тождество. При опытахъ полученія кристалловъ гидрата извести онъ наблюдалъ, что кристаллики, образовываясь на стеклѣ, крѣпко къ нему приставали. Отсюда можно заключить, что связывающая сила гидрата извести въ цементѣ должна быть очень значительна.

2) Второе новообразованіе, повидимому, представляетъ аморфную массу, которая однако съ теченіемъ времени дѣлается отчасти кристаллическою. Эта масса остается на мѣстѣ разложенныхъ минераловъ и должна поэтому быть въ водѣ нерастворимой. Опредѣлить природу аморфной массы довольно трудно. По всей вѣроятности въ ней заключается болѣе, нежели одно химическое соединеніе. По Лешателье ея главная составная часть должна представлять водный силикатъ извести состава  $2(CaO, SiO_2) \cdot 5H_2O$ . Михаэлисъ полагаетъ, что это вещество, вслѣдствіе его нерастворимости, должно быть

въ состояніи коллоидальномъ. Здѣсь долженъ также присутствовать водный глиноземъ (миѣніе Тернебома). Бѣда ли можно допустить, чтобы, съ теченіемъ времени, могли образоваться въ цементѣ известковые алюминаты, вслѣдствіе ихъ легкой разлагаемости. Точно также, при наличномъ значительномъ избыткѣ извести, нельзя допустить возможность выдѣленія кремневой кислоты въ замѣтномъ количествѣ.

Изъ опытовъ надъ тонкими пластинками, приготовленными изъ затвердѣвшаго цемента, выясняется, что на аморфную массу дѣйствуетъ даже разведенная уксусная кислота. При этомъ остается желатинозное вещество, которое легко окрашивается и при высыханіи стягивается. Это должно указывать, повидному, на присутствіе силиката. Такимъ образомъ можно заключить, что аморфная масса должна состоять изъ силиката извести, вѣроятно, также съ примѣсью воднаго глинозема.

3) Рядомъ съ описанными двумя новообразованіями находится иногда известковый шпатъ (кристаллическая форма  $CaCO_3$ ). Вещество это внутри цементной массы никогда не встрѣчается въ сколько нибудь значительномъ количествѣ, но близко къ наружной поверхности массы оно играетъ существенную роль. Поверхностная оболочка старыхъ цементныхъ трубъ (взятыхъ для опыта), представлялась даже состоящею преимущественно изъ известкового шпата.

#### § 4. Процессъ твердѣнія цемента по Тернебому.

На основаніи микроскопическаго строенія затвердѣвшаго цемента (фиг. 5) можно слѣдующимъ образомъ представить себѣ ходъ твердѣнія цемента.

Когда порошокъ цемента замѣшивается съ водой, то прежде всего и легче всего подвергаются ея дѣйствію зерна алита, и тѣмъ легче, чѣмъ богаче алитъ глиноземомъ, и чѣмъ болѣе вода содержитъ угольной кислоты.

При раствореніи извести, небольшого количества кремнезема и глинозема (также и щелочей, которыя вѣроятно замѣщаютъ часть извести), на зернахъ алита образуется желатинозная оболочка, которая при поглощеніи воды, разбухаетъ; вслѣдствіе этого зерна приходятъ въ болѣе тѣсное взаимное соприкосновеніе и прилипаютъ одно къ другому, такъ что цементный растворъ получаетъ извѣстную вязкость. Подобнаго взгляда держится и Гауеншильдъ. Онъ говоритъ: схватываніе и послѣдующее твердѣніе цемента можно объяснить тѣмъ, что водою разлагаются отдѣльныя составныя части съ поверхности и покрываются коллоидальною связывающею массою, которая мало-по-малу принимаетъ кристаллическое строеніе.

Реакція, которая обуславливаетъ первоначальное твердѣніе, скоро ослабѣваетъ, потому что дальнѣйшему дѣйствію воды препятствуетъ желатинозная оболочка, образуемая вокругъ зеренъ алита. Послѣдующее твердѣніе должно основываться частью на этой реакціи, продолжающейся въ теченіе продолжительнаго времени, но, также, и въ весьма существенной степени, на послѣдующей кристаллизаціи гидрата извести, которымъ послѣдовательно заполняются въ цементѣ всѣ пустоты, большія и малыя. Лешателье объясняетъ это свойствомъ пересыщенныхъ растворомъ, съ чѣмъ нельзя не согласиться.

Закончивъ этимъ интересныя изслѣдованія Тернебома, заключающія въ себѣ и петрографическую часть работы Лешателье по изслѣдованію цементовъ, а также разницу въ полученныхъ результатахъ обоихъ ученыхъ, перейдемъ къ изложенію теоріи твердѣнія цементныхъ растворовъ по Лешателье.



## ГЛАВА II. Теорія твердніа цементнаго раствора по Лешателье.

### 5. Процессы въ горнѣ обжигательной печи.

Прежде чѣмъ приступить къ изложенію этой теоріи, опишемъ образованіе портланд-цемента въ горнѣ обжигательной печи и процессы при этомъ происходящіе, придерживаясь мнѣнія проф. Дементьева по этому вопросу<sup>1)</sup>.

При процессѣ обжига въ горнѣ обжигательной печи составныхъ частей портланд-цемента, глины и углекислой извести, можно предположить образованіе слѣдующихъ соединений.

#### А. Силикаты извести.

1.  $SiO_2 \cdot CaO$ —однокальціевый силикатъ. Это соединеніе встрѣчается въ цементахъ довольно рѣдко и роли при твердніи не играетъ.

2.  $SiO_2 \cdot 2CaO$ —двукальціевый силикатъ. Предполагаютъ, что присутствіе этого силиката въ нѣкоторыхъ кускахъ цемента, даетъ имъ свойство разсыпаться въ порошокъ при охлажденіи (пульверизироваться), переходя въ аллотропическое видоизмѣненіе.

3.  $SiO_2 \cdot 3CaO$ —трехкальціевый силикатъ. По мнѣнію Лешателье, этому силикату принадлежитъ существенная роль при твердніи.

#### В. Аллюминаты извести.

Аллюминатовъ извести существуетъ повидимому также нѣсколько, но они существеннаго вліянія на твердніе не имѣютъ, исключая трехкальціеваго аллюмината. Трехкальціевый аллюминатъ  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ , точно также, какъ и трехкальціевый силикатъ играетъ существенную роль при твердніи.

#### В. Ферриты извести.

Известь въ обжигательной печи повидимому вступаетъ въ соединеніе съ окисью желѣза, образуя ферриты или же сложныя соединенія, состоящія изъ желѣза и сложныхъ силикатовъ извести и глинозема.

Въ обжигательной печи при обжигѣ смѣси глины и углекислой извести происходятъ слѣдующія явленія.

При постепенномъ повышеніи температуры удаляется изъ смѣси влажность, затѣмъ при температурѣ 400°—500° удаляется вода, химически связанная съ глиною.

Далѣе при температурѣ 700°—900° (C) разлагается углекислая известь  $CaCO_3$  на окись кальція— $CaO$  и углекислоту— $CO_2$ . Углекислота удаляется, а окись кальція начинаетъ вступать въ химическія соединенія съ составными частями глины:  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  и другими. Образуется рядъ силикатовъ, аллюминатовъ и ферритовъ извести.

Въ періодъ обжига, при которомъ температура достигаетъ 900°—1000° C, главнымъ образомъ образуются аллюминаты и ферриты извести.

Затѣмъ въ послѣдній періодъ обжига, когда температура доходитъ до 1500° C, при которой матеріалъ уже начинаетъ спекаться, т. е. когда собственно образуется портланд-цементъ—въ этотъ періодъ обжига образуются силикаты извести—именно трехкальціевый силикатъ— $SiO_2 \cdot 3CaO$  и отчасти трехкальціевый аллюминатъ  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ . Въ этомъ періодѣ обжига ферриты извести вступаютъ въ соединеніе съ двойнымъ силикатомъ извести и алюминія— $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot CaO$ ; при этомъ часть глинозема замѣщается окисью желѣза. Это послѣднее соединеніе, болѣе легкоплавное, чѣмъ трехкальціевые—силикатъ  $SiO_2 \cdot 3CaO$  и аллюминатъ  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ —является для нихъ растворителемъ. Картину можно представить такъ: при температурѣ 1500° C образуется пересыщенный растворъ  $SiO_2 \cdot 3CaO$  и  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ , подобный раствору соли, но не въ водѣ, а въ массѣ расплавленнаго, сложнаго силикага желѣза. При охлажденіи этого пересыщеннаго раствора изъ общей

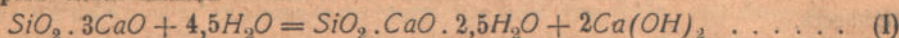
<sup>1)</sup> К. Г. Дементьевъ. Технологія строительныхъ матеріаловъ. 1904 г.

массы должны прежде всего выкристаллизоваться силикаты и алюминаты кальция, какъ болѣе трудноплавкія соединенія, а сложный ферритъ желѣза играетъ роль выполняющаго матеріала. Такова картина послѣдовательныхъ явленій и схема вѣроятныхъ реакцій, имѣющихъ мѣсто при обжигѣ портландъ-цемента. Быть можетъ одновременно образуются и другія сложные соединенія, но они, по всей вѣроятности не играютъ существенной роли при твердѣніи портландъ-цемента.<sup>4)</sup>

## § 6. Теорія твердѣнія растворовъ портландъ-цемента по Лешателье.

Изъ своихъ минералогическихъ опытовъ Лешателье пришелъ къ выводу, что изъ всѣхъ минераловъ клинкера, важнѣйшую роль при схватываніи цемента играетъ минералъ № 1 (алитъ Тернебома), которому онъ даетъ формулу  $SiO_2 \cdot 3CaO$ .

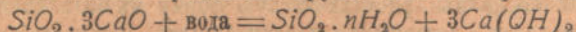
Этотъ трехизвестковый силикатъ имѣетъ способность въ присутствіи воды гидратизироваться съ разложеніемъ на водный одноизвестковый силикатъ, нерастворимый въ водѣ, и гидратъ окиси кальция



Это главная реакція при твердѣніи портландъ-цементовъ. Какъ видно изъ формулы, при этой реакціи происходитъ выдѣленіе свободного гидрата извести, количество котораго, по мѣрѣ твердѣнія цемента—съ теченіемъ времени должно увеличиваться. Гидратъ окиси кальция обладаетъ свойствомъ постепенно переходить изъ аморфнаго состоянія въ кристаллическое. Свойство гидрата окиси кальция переходить въ цементъ въ кристаллическое состояніе, предположенное Лешателье, подтвердилъ Тернебомъ, сравнивъ кристаллы, приготовленные для этого, съ кристаллами взятыми изъ отвердѣвшаго цемента.

Наконецъ С. Ф. Глинка доказалъ, что въ отвердѣвшемъ портландъ-цементномъ растворѣ находится свободный кристаллическій гидратъ извести. Существованіе соединенія  $SiO_2 \cdot CaO \cdot 2,5H_2O$ —воднаго однокальціевого силиката—въ цементномъ растворѣ окончательно не доказано, и на счетъ состава этого силиката существуетъ разногласіе.

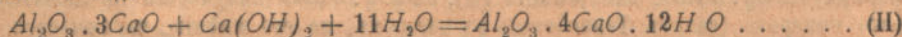
Поэтому проф. Байковымъ предложено другое объясненіе реакціи (I), а именно:



Выдѣлившійся при этомъ гидратъ кремнезема, какъ коллоидальное тѣло, окруженное насыщеннымъ растворомъ гидрата извести, поглощаетъ этотъ послѣдній, образуя аморфное тѣло неопредѣленнаго состава. Это объясненіе согласуется съ высказаннымъ мнѣніемъ Тернебома, и опытами Ньюбери, Смита и другихъ, и кромѣ того находитъ себѣ подтвержденіе и въ новѣйшихъ взглядахъ на роль коллоидальныхъ тѣлъ при твердѣніи цемента.

Кромѣ того, объясненіе реакціи (I), данное Байковымъ, нисколько не противорѣчитъ главной мысли Лешателье, что «въ числѣ химическихъ реакцій схватыванія цемента заключается выдѣленіе свободного гидрата извести, на чемъ собственно и построена дальнѣйшая теорія твердѣнія раствора.

2) Одновременно съ главной только что описанной реакціей (I), по Лешателье, совершается и другая. Трехкальціевый алюминатъ вступаетъ въ соединеніе съ частью «свободившагося гидрата извести и образуетъ водный четырехкальціевый алюминатъ, нерастворимый въ водѣ.

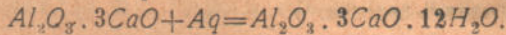


При этомъ вторая реакція (II) ускоряетъ (I) первую, поглощая водную окись кальция. Такъ какъ образованіе водной окиси кальция генетически связано съ образованіемъ воднаго однокальціевого силиката, то, слѣдовательно, удаляя изъ сферы реакціи (I) часть  $Ca(OH)_2$ , помощью алюмината извести, мы, согласно закону Бертоле, увеличиваемъ ско-

<sup>4)</sup> К. Г. Дементьевъ. Технологія строительныхъ матеріаловъ. 1904 г., стр. 146—148.

рость реакціи, или другими словами быстроту твердвѣнія портландъ-цемента. Поэтому, чѣмъ больше цементъ содержитъ глинозема, тѣмъ быстрее происходитъ схватываніе и твердвѣніе.

Тотъ же трехкальціевый алюминатъ, по мнѣнію Лешателье, и непосредственно гидратируется съ водой, подобно гипсу



Разсмотримъ, какимъ образомъ объясняется твердвѣніе раствора цемента на основаніи реакцій (I) и (II).

Цементный растворъ въ моментъ затворенія цемента съ водой представляетъ изъ себя смѣсь частицъ цемента, песка и воды. Для того, чтобы эта масса превратилась въ сухое твердое тѣло, нерастворимое въ водѣ, обладающее извѣстною крѣпостью, необходимо выполнить слѣдующія условія:

- 1) Вода должна исчезнуть.
- 2) Промежутки между частицами цемента и песка должны также исчезнуть, тѣмъ говоря—должны заполниться твердыми веществами.
- 3) Полученное сухое вещество должно съ теченіемъ времени приобрести извѣстную крѣпость.
- 4) Отвердѣвшій цементный растворъ не долженъ разрушаться отъ дѣйствія воды и атмосферныхъ дѣятелей.

Изъ реакцій (I) и (II) видно, что вода при твердвѣніи цементнаго раствора дѣйствительно исчезаетъ, образуя нерастворимыя въ водѣ химическія соединенія съ силикатомъ и алюминатомъ извести. Какъ показали микроскопическія изслѣдованія, образованіе такихъ гидратизированныхъ соединеній сопровождается увеличеніемъ объема и разбуханіемъ, вслѣдствіе чего зерна приходятъ въ болѣе тѣсное взаимное соприкосновеніе и прилипають одно къ другому. Этотъ моментъ соответствуетъ началу твердвѣнія цемента или его схватыванію.

Наконѣцъ, увеличеніе крѣпости раствора съ теченіемъ времени слѣдуетъ приписать постепенному переходу аморфной выдѣлившейся водной окиси кальція  $Ca(OH)_2$  въ болѣе плотное кристаллическое видоизмѣненіе и переходу образовавшагося гидрата одноизвестковаго силиката также въ кристаллическую форму въ видѣ длинныхъ игольчатыхъ и нитевидныхъ кристалловъ, совершенно перепутанныхъ между собою и окутывающихъ со всѣхъ сторонъ также и кристаллы гидрата извести  $[Ca(OH)_2]$ .<sup>1)</sup>

Гидратъ окиси кальція тѣло довольно легко растворимое въ водѣ. Въ данномъ случаѣ оно водой не выщелачивается. Непонятное на первый взглядъ явленіе это объясняется слѣдующимъ опытомъ. Если схватившійся цементный образецъ помѣстить въ кипяченую или дистиллированную воду, лишенную углекислоты, и эту воду часто мѣнять, то черезъ нѣкоторое время цементный образецъ развалится, известь выщелачится, останется лишь желатинозная масса—смѣсь гидратовъ  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ . Если же взять для опыта обыкновенную воду, рѣчную или озерную, содержащую углекислоту, то поверхность цемента быстро покроется корочкой углекислой извести, нерастворимой въ водѣ и препятствующей выщелачиванію.

Такова въ общихъ чертахъ теорія твердвѣнія раствора портландъ-цемента по Лешателье. Въ главныхъ реакціяхъ твердвѣнія цемента I и II—Лешателье предполагалъ, что въ первой реакціи участвуетъ минералъ № 1—(алитъ Тернебома), которому онъ далъ формулу  $SiO_2 \cdot 3CaO$ ; для реакціи (II),  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$  получается по Лешателье изъ бурого минерала (селитъ Тернебома), въ которомъ, по его мнѣнію, заключается весь глиноземъ клинкера.

Реакція II начинается, лишь только получится  $Ca(OH)_2$  изъ реакціи I—изъ этого вытекаетъ, что селитъ разлагается непосредственно и почти одновременно съ алитомъ, что какъ видѣли раньше не вѣрно, такъ какъ на селитъ вода не дѣйствуетъ. Отсюда слѣ-

1) Дементьевъ. Технологія строительныхъ матеріаловъ 1914 г. стр. 150.

дуетъ правильность предположенія Тернебома, помимо другихъ его доказательствъ, что  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$  заключается въ алитѣ, форму котораго отъ даетъ въ видѣ  $x(SiO_2 \cdot 3CaO) + 9Al_2O_3 \cdot 3CaO$ . Если признать эту формулу алита правильной, то реакціи I и II очевидно остаются прежнія и элементы, входящіе въ реакціи, получаются изъ алита, а селитъ остается въ сторонѣ отъ реакціи. Коррективъ Тернебома въ формулѣ алита только разъясняетъ процессъ тверднія цементнаго раствора.

### ГЛАВА III. Схватываніе и твердніе цементнаго раствора и вліяніе различныхъ факторовъ на этотъ процессъ. ■

#### § 7. Схватываніе и твердніе цементнаго раствора.

Процессъ тверднія цементнаго раствора, какъ указывалось раньше, состоитъ изъ двухъ періодовъ: схватыванія и тверднія.

Схватываніемъ называется та часть процесса тверднія, при которомъ совершается переходъ изъ удобоподвижнаго тѣстообразнаго состоянія въ твердое камневидное вещество. Различаютъ начало схватыванія и конецъ схватыванія.

Начало и конецъ схватыванія опредѣляется иглой Вика.

За начало схватыванія принято считать тотъ моментъ, когда игла Вика (діам. 1 см.), нагруженная грузомъ въ 300 граммовъ, не будетъ въ состояніи пройти слой раствора толщиной въ 4 см. насквозь, но остановится, не доходя до конца на 1 м.м.

За конецъ схватыванія принято считать тотъ моментъ, когда игла Вика съ тою же нагрузкой углубляется въ цементное тѣсто не болѣе, чѣмъ на  $\frac{1}{2}$  м.м. Промежутокъ времени отъ начала схватыванія до конца схватыванія называется срокомъ схватыванія.

Опредѣленіе начала и конца схватыванія цемента иглой Вика является опредѣленіемъ условнымъ и не имѣетъ научнаго обоснованія.

Проф. Дементьевъ даетъ слѣдующее опредѣленіе началу схватыванія:

«Началомъ схватыванія будетъ моментъ, когда отдѣльныя частицы алита, раздѣленныя другъ отъ друга массою воды, подъ вліяніемъ химическаго дѣйствія этой воды разбухнутъ настолько, что въ состояніи будутъ другъ къ другу прилипнуть и застыть въ одну общую массу»<sup>1)</sup>

Такое опредѣленіе является научно-обоснованнымъ, такъ какъ оно исходитъ изъ самой природы процесса тверднія.

Изъ разсмотрѣнія главныхъ реакцій (I) и (II) можно заключить, что процессъ схватыванія повидимому закончится, когда закончатся въ цементномъ тѣстѣ самыя реакціи, иными словами — когда строго опредѣленное количество воды химически будетъ связано въ новообразованіяхъ реакцій (I) и (II), а именно  $SiO_2 \cdot CaO \cdot 2,5H_2O$  (или по Байкову  $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) и  $Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot 12H_2O$  и  $Ca(OH)_2$ .

На основаніи этихъ соображеній концу схватыванія мы можемъ дать такое опредѣленіе: концомъ схватыванія будетъ моментъ, когда вся вода въ цементномъ тѣстѣ, въ количествѣ эквивалентномъ исчезнетъ, войдя химически въ новообразованія цементнаго раствора.

Насколько начало и конецъ схватыванія по этимъ теоретическимъ опредѣленіямъ, совпадаютъ съ началомъ и концомъ схватыванія условныхъ опредѣленій (при помощи иглы Вика) сказать нельзя, во всякомъ случаѣ, мы полагаемъ, что они повидимому близки настолько, что для цѣлей практики ихъ можно считать совпадающими.

<sup>1)</sup> Технология строительныхъ матеріаловъ. К. Дементьевъ. 1904 г. стр. 150.

Мы довольно подробно остановились на первомъ періодѣ твердѣнія — схватыванія—потому, что дальнѣйшіе выводы будутъ главнымъ образомъ базироваться именно на этомъ періодѣ.

Второй періодъ твердѣнія цементнаго раствора—собственно твердѣніе, т. е. окончательное окаменѣніе схватившагося цементнаго тѣста, обусловливается постепеннымъ переходомъ аморфной выдѣлившейся водной окиси кальція въ кристаллическое видоизмѣненіе и переходомъ образовавшагося гидрата одноизвестковаго силиката также въ кристаллическую форму.

Периодъ твердѣнія продолжается весьма долго. Какъ указывалось раньше, Тернебомъ нашелъ еще неразложившіяся зерна алита, въ изслѣдуемыхъ имъ кускахъ отвердѣвшаго цемента, бывшаго 20 лѣтъ подъ водой. Сопротивленіе механическимъ усиліямъ продолжаетъ возрастать замѣтно въ теченіе нѣсколькихъ лѣтъ.

Диккергофъ на основаніи своихъ опытовъ нашелъ, что образцы цементныхъ растворовъ, твердѣвшіе на воздухѣ, показали къ концу 5-го года слѣдующія приращенія сопротивленія разрыву:

1)	для	состава	1:1	.....	9,2%
2)	>	>	1:2	.....	8,4%
3)	>	>	1:3	.....	2,8%

Скорость схватыванія портландъ-цемента регламентируется существующими на этотъ счетъ нормами. «Техническія условія для пріемки портландъ-цементовъ» требуютъ выполненія слѣдующихъ условій схватыванія: «начало схватыванія должно наступить не ранѣе 20 минутъ, считая съ момента прибавленія воды къ цементу, а конецъ схватыванія не ранѣе одного часа и не позже 12 часовъ, при нормальной густотѣ раствора».

## § 8. Вліяніе качества воды на процессъ схватыванія цементнаго раствора.

На скорость схватыванія цементнаго раствора вліяютъ многія обстоятельства. Эти обстоятельства можно раздѣлить на двѣ категоріи: обстоятельства внутреннія, зависящія отъ самаго цемента, и обстоятельства внѣшнія—отъ цемента не зависящія.

Къ внутреннимъ факторамъ относятся: химическій составъ цемента, время его приготовленія и тонкость помола. Внутреннихъ факторовъ мы подробно разбирать не будемъ, такъ какъ это не входитъ въ задачу настоящаго труда. Въ дальнѣйшемъ мы будемъ считать, что имѣемъ дѣло съ цементомъ, удовлетворяющимъ техническимъ условіямъ.

Разсмотримъ факторы внѣшніе.

Къ факторамъ внѣшнимъ относятся: 1) качество, количество и температура воды, взятой для затворенія; 2) температура воздуха и 3) влажность воздуха.

Качество воды зависитъ отъ растворившихся въ ней кислотъ и солей. Кислая реакція оказываетъ на процессъ схватыванія неблагоприятное вліяніе, и потому вода, имѣющая въ своемъ составѣ кислоты, исключая углекислоту, для затворенія непримѣнима. Содержаніе въ водѣ  $CO_2$  ускоряетъ схватываніе.

Соли, растворяющіяся въ водѣ, по отношенію къ скорости схватыванія, раздѣляются на двѣ категоріи: одніе ускоряютъ схватываніе, другія замедляютъ. Иногда одна и та же соль, въ зависимости отъ степени концентраціи раствора, можетъ либо ускорить схватываніе, либо его замедлить.

Вопросъ этотъ освѣщенъ изслѣдованіями Кандло и Лямина. Результаты ихъ работъ мы и приведемъ.

Основная реакція твердѣнія цементнаго раствора —  $SiO_2 \cdot 3CaO + \text{вода} = SiO_2 \cdot CaO \cdot 2,5H_2O + 2Ca(OH)_2$  — ускоряется по закону Бертоле, если продукты образованія тотчасъ вступаютъ въ новую реакцію. Образованіе  $Ca(OH)_2$  генетически свя-

зано съ образованіемъ  $SiO_2 \cdot CaO \cdot 2,5H_2O$ ; если заставимъ вступить въ новую реакцію гидратъ окиси кальція, т. е. удалимъ его изъ сферы главной реакціи, то мы ускоримъ эту реакцію. Наоборотъ, если какимъ либо образомъ удаленіе  $Ca(OH)_2$  замедляется, то скорость схватыванія должна уменьшиться. Удалить  $Ca(OH)_2$  изъ сферы взаимодействія возможно прибавленіемъ въ воду, взятую для затворенія, соли, дающей съ  $CaO$  нерастворимое соединеніе.

При прибавленіи къ водѣ шавелекислаго калия повышается значительно скорость реакціи, а слѣдовательно и скорость схватыванія, потому что шавелекислый калий вступаетъ въ соединеніе съ  $Ca(OH)_2$  и даетъ трудно растворимую шавелекальціевую соль. Вода, насыщенная углекислотой, образуетъ съ  $Ca(OH)_2$  нерастворимый въ водѣ  $CaCO_3$ , поэтому ускоряетъ схватываніе. По этой же причинѣ ускоряетъ схватываніе растворъ въ водѣ соды (углекислаго натрія).

Растворы поваренной соли (хлористаго натрія) и другихъ солей, не вступающихъ въ реакцію съ  $Ca(OH)_2$ , напротивъ замедляютъ процессъ схватыванія, такъ какъ эти соли, растворяясь, отнимаютъ часть воды, потребной для гидратации цемента.

По закону массъ скорость реакціи пропорціональна произведенію дѣйствующихъ массъ т. е. количеству тѣлъ, заключающихся въ единицѣ объема. На основаніи этого закона скорость реакціи при тверднѣнн цемента есть величина постоянная до тѣхъ поръ, пока концентрація воды и цемента остаются величинами постоянными.

Если вмѣсто чистой воды, взять растворъ соли, не вступающей въ соединеніе съ  $CaO$ , то уменьшится концентрація одного изъ дѣйствующихъ тѣлъ-воды, такъ какъ въ единицѣ объема раствора собственно воды будетъ находится меньше, чѣмъ въ чистой водѣ.

Слабые растворы хлористаго кальція, какъ не вступающаго въ соединеніе съ  $Ca(OH)_2$ , на основаніи только что приведеннаго закона, замедляютъ процессъ схватыванія. При насыщенномъ же растворѣ хлористый кальцій ( $CaCl_2$ ) вступаетъ въ соединеніе съ  $Ca(OH)_2$  и потому ускоряетъ процессъ схватыванія.

## 9. Вліяніе количества воды на процессъ схватыванія цементнаго раствора.

Мы разсмотрѣли какое вліяніе оказываетъ качество воды на скорость схватыванія цементнаго раствора. Разсмотримъ далѣе, какое вліяніе оказываетъ на скорость схватыванія количество воды.

Избытокъ воды замедляетъ схватываніе. Это слѣдуетъ изъ того, что большее количество воды слишкомъ отдаляетъ частицы цемента (зерна алита) другъ отъ друга и кромѣ того понижаетъ температуру реакціи.<sup>1)</sup> Чѣмъ гуще затворено тѣсто, т. е. чѣмъ меньше воды взято, тѣмъ скорость схватыванія увеличивается. Это положеніе вѣрно только до нѣкотораго предѣла. Минимальнымъ количествомъ воды будетъ то, которое необходимо для главныхъ химическихъ реакціи I и II тверднѣнн цемента.

Если взять количество воды недостаточное для затворенія, то нѣкоторая часть цемента останется въ видѣ порошка и не приметъ участія въ тверднѣнн всей массы раствора.

Такимъ образомъ мы приходимъ къ заключенію, что необходимое количество воды для затворенія цемента не есть строго определенное одно какое нибудь количество, въ возможно нѣкоторое довольно широкое колебаніе этого количества, въ зависимости отъ цѣлей практики безъ вреда для цементнаго раствора.

Необходимое количество воды для растворовъ изъ чистаго цемента измѣняется отъ 18% до 33% по вѣсу, въ зависимости отъ сорта цемента.

<sup>1)</sup> Технологія стронт. матеріаловъ. Дементьевъ 1904 года.

Необходимое количество воды для растворовъ изъ цемента и песка, зависитъ отъ многихъ причинъ, какъ то: пропорція раствора, влажность и гранулометрической составъ песка, влажность окружающей среды и т. д., и колеблется въ предѣлахъ примѣрно 5% — 12% по вѣсу. Въ зависимости отъ количества воды цементные растворы раздѣляются на «мягкіе или пластичные» и «жесткіе».

Мягкіе употребляются для кладки кирпича и камней, жесткіе — для бетонныхъ работъ, напр. выдѣлка трубъ въ формахъ и др.

Среднее промежуточное положеніе между мягкими и жесткими растворами занимаютъ растворы нормальной густоты, служащіе характеристикой качества цемента и поэтому примѣняемые при приемѣ порландъ-цементовъ. Количество воды для растворовъ нормальной густоты является довольно постояннымъ для каждого сорта цемента.

Условлено густоту тѣста изъ чистаго цемента (безъ песка) считать нормальной съ добавкой такого количества воды, при которомъ указатель густоты Тетмайера въ приборѣ Вика-Тетмайера, погружаясь въ тѣсто, остановится на 6-мъ дѣленіи шкалы (въ предѣлахъ отъ 5<sup>1/2</sup> до 6<sup>1/2</sup> дѣленій шкалы).

Условлено густоту тѣста изъ цемента и песка считать нормальной съ добавкой такого количества воды, при которомъ, послѣ ударной работы бабой нормальной цементнаго копра Клебе—въ килограмметрѣ на каждые 10 граммъ сухой смѣси—появляется вода изъ нижней части образца.

При опредѣленіи количества воды для затворенія «мягкаго» тѣста, имѣется ввиду полученіе раствора такой консистенціи, которую удобно наносить каменщику лопаткой на камни.

Количество же воды для затворенія «жесткаго» раствора, главнымъ образомъ должно удовлетворять условію полученія бетона возможно большей крѣпости, плотности, и т. п. въ зависимости отъ назначенія даннаго раствора.

Употребляемые въ настоящее время способы опредѣленія количества воды, для полученія желаемой консистенціи цементнаго раствора, могутъ быть въ общемъ подведены подъ три типа:

- 1) Практической способъ—«на ошупь».
- 2) При помощи вспомогательныхъ приборовъ,
- 3) Теоретическій способъ—при помощи расчета.

Первый способъ — какъ указываетъ самое названіе — примѣняется обычно на практикѣ, второй—главнымъ образомъ въ лабораторіяхъ при испытаніи цементовъ, во время приемки ихъ на работы, и наконецъ третій способъ употребляется сравнительно рѣдко, вслѣдствіе своей недостаточной разработки; онъ примѣняется, какъ вспомогательное средство при первыхъ двухъ способахъ. Разсмотримъ эти способы отдѣльно.

## § 10. Практической способъ опредѣленія густоты цементнаго раствора.

Практической способъ опредѣленія густоты цементнаго раствора «на ошупь», въ большинствѣ случаевъ, примѣняется для тѣста изъ чистаго цемента при его приемкѣ. Такъ напримѣръ, во время приемки цементовъ, предназначенныхъ для портовыхъ работъ въ Булони и Кале <sup>1)</sup> количество воды для тѣста нормальной густоты изъ чистаго цемента опредѣлялось слѣдующими признаками:

1) Консистенція тѣста не должна измѣняться, если продолжить перемѣшиваніе сверхъ положенныхъ 5 минутъ, еще 3 минуты;

<sup>1)</sup> И. Малюга. Составъ и способъ приготовления цементнаго раствора (бетона) для полученія наибольшей крѣпости. Петербургъ. 1895, стр. 367.

2) Небольшое количество тѣста, взятое лопаточкой, должно легко отдѣляться отъ нея, и падая съ высоты около 50 см. на мраморную доску, приблизительно сохранять свою форму и не давать трещинъ;

3) Небольшое количество тѣста, взятое въ руку, должно, при вѣсколькихъ сильныхъ сотрясеніяхъ, принимать круглую форму, и на его поверхности при этомъ должна выступить вода. Во время этой манипуляціи тѣсто не должно расплываться или приста- вать къ рукѣ; брошенное же съ высоты около 50 см. должно сохранять, слегка сплюс- нившись, свою округленную форму и не давать трещинъ;

4) Нормальное количество воды должно быть таково, чтобы, съ одной стороны, при меньшей пропорціи тѣсто дѣлалось сухимъ, вязкимъ и давало бы при паденіи тре- щины, съ другой стороны, при увеличеніи количества воды на  $1^{\circ}$ — $2^{\circ}$  отъ вѣса це- мента, тѣсто дѣлалось бы полужидкимъ, пристающимъ къ лопаткѣ, расплывающимся, пристающимъ къ рукѣ и неспособнымъ скатываться въ шарики и пр.

Какъ указано выше способъ «на ощупь» по преимуществу примѣняется для тѣста изъ чистаго цемента, но иногда онъ примѣняется также и для опредѣленія консистенціи цементнаго раствора съ пескомъ. Такъ, напримѣръ, Фере примѣнялъ при своихъ лабо- раторныхъ изслѣдованіяхъ способъ, основанный на наблюденіи того состоянія, которое принимаетъ цементный растворъ, когда количество воды въ немъ постепенно возрастаетъ. При относительно маломъ количествѣ воды частицы раствора обладаютъ весьма ничтож- нымъ взаимнымъ сдѣлаемъ, и ихъ трудно собрать въ одну массу, если же это и удастся, то самаго слабаго усилія достаточно для того, чтобы снова ихъ разъединить. По мѣрѣ увеличенія количества воды увеличивается и сдѣленіе частицъ раствора и наступаетъ моментъ, когда растворъ, не достигнувъ степени пластичности тѣста изъ чистаго цемента, допускаетъ однако измѣненіе формы, не рассыпаясь (въ особенности, если растворъ не особенно тощій). Если въ этомъ состояніи сглаживать растворъ лопаточкой, то на его поверхности выступаетъ вода. Эту послѣднюю консистенцію Фере и считаетъ «нормальной».

Изъ двухъ приведенныхъ примѣровъ видно, что опредѣленіе количества воды для затворенія цементнаго раствора «на ощупь» строго говоря, имѣетъ значеніе только для полученія опредѣленной «нормальной» густоты тѣста или изъ чистаго цемента, или изъ жирнаго цементнаго раствора. Для того же цементнаго раствора приведенныя пра- вила оказываются непригодными. Опредѣленная двумя указанными способами нормальная густота тѣста имѣетъ въ виду главнымъ образомъ удобство работы, и по опытамъ самого Фере не всегда соответствуетъ полученію раствора наибольшей крѣпости<sup>1)</sup>.

Вообще до сихъ поръ не выработано правилъ для опредѣленія количества воды «на ощупь» для тощихъ растворовъ и для «жесткихъ» растворовъ и бетоновъ.

## § 11. Опредѣленіе консистенціи цементныхъ растворовъ при помощи вспомогательныхъ приборовъ.

Этотъ способъ получилъ въ Россіи и за границей широкое распространеніе со вре- мени введенія нормальныхъ правилъ испытанія портландскаго цемента при приемѣ на работы. Для полученія сравнимыхъ результатовъ принята такъ называемая «нормальная» густота тѣста изъ чистаго цемента, опредѣляемая известнымъ приборомъ Вика-Тетмайера.

Опредѣленіе термина — «растворъ нормальной густоты изъ чистаго цемента» — при- ведено выше. Описание прибора Вика-Тетмайера и способъ опредѣленія тѣста нормаль- ной густоты заимствуемъ изъ «Техническихъ условій приемки портландъ-цементовъ» § 46.

Количество воды для нормальной густоты раствора изъ чистаго цемента опредѣ- ляется измѣрителемъ густоты — приборомъ, состоящимъ изъ стержня съ діаметромъ въ 1 см., съ тарелкой, при общемъ вѣсѣ стержня и тарелки 300 граммовъ, изъ конической

<sup>1)</sup> И Малюга. Ibidem.



коробки высотой въ 4 см., нижнимъ диаметромъ въ 8 см. и верхнимъ — въ 9 см. для помѣщения цементнаго тѣста; и изъ шкалы съ дѣлениями въ миллиметрахъ, снабженной указателемъ.

Для опредѣленія нормальной густоты раствора изъ чистаго портландъ-цемента затворяютъ 400 граммовъ портландъ-цемента съ такимъ количествомъ воды, которое примѣрно даетъ густоватое тѣсто, перемѣшиваютъ тѣсто самымъ тщательнымъ образомъ въ течение 5 минутъ, послѣ чего наполняютъ имъ, по возможности безъ встряхиванія, кольцевую коробку, уложенную на невсасывающей (напримѣръ стеклянной) подкладкѣ, и срѣзаютъ излишекъ тѣста. Засимъ, стержень измѣрителя густоты спускаютъ осторожно настолько, чтобы указатель сталъ противъ дѣленія „40“ на шкалѣ, послѣ чего даютъ стержню свободно погружаться въ тѣсто.

То количество воды въ % по вѣсу отъ взятаго для затворенія портландъ-цемента, при которомъ погруженіе стержня соответствуетъ положенію указателя противъ дѣленія „6“ на шкалѣ, въ предѣлахъ отъ  $5\frac{1}{2}$  до  $6\frac{1}{2}$ , есть нормальное для раствора изъ чистаго портландъ-цемента. Это количество воды опредѣляется съ точностью до  $\frac{1}{2}\%$ .

Описанный способъ пригоденъ только для «мягкаго», пластичнаго тѣста.

Для «жесткаго» тѣста способъ непригоденъ, такъ какъ измѣритель густоты опускается подъ дѣйствіемъ нагрузки гораздо большей, но неравномерно и производитъ трещины и наслоенія въ тѣстѣ.

Въ растворахъ съ пескомъ, также какъ и при растворѣ изъ чистаго цемента, для полученія сравнимыхъ результатовъ, принята «нормальная густота тѣста», опредѣляемая при помощи нормальной копра Клебе.

Опредѣленіе термина — «растворъ нормальной густоты изъ цемента съ пескомъ» приведенъ выше.

Описаніе способа опредѣленія «тѣста нормальной густоты» заимствуемъ также изъ «Техническихъ условій пріемки портландъ-цементовъ» — § 7.

**Примѣчаніе 1.** Опредѣленіе количества воды для нормальной густоты раствора изъ смѣси портландъ-цемента съ пескомъ.

Количество воды для затворенія смѣси изъ одной части портландъ-цемента и трехъ частей нормальнаго песка, соответствующее нормальной густотѣ раствора съ пескомъ, или опредѣляется извѣстною механическою работою на цементномъ копрѣ, или же берется на основаніи заявленія завода. Если количество воды не можетъ быть опредѣлено на цементномъ копрѣ и не указано заводчикомъ, то слѣдуетъ взять около 10% воды отъ вѣса сухой смѣси и измѣнять это количество соответственно дѣйствительной надобности для полученія удобно обрабатываемаго тѣста.

Для опредѣленія на цементномъ копрѣ количества воды, употребляемаго для затворенія упомянутой смѣси, къ 750 грамъ смѣси изъ одной части портландъ-цемента и трехъ частей нормальнаго песка, насухо перемѣшанной, прибавляется, примѣрно, такое количество воды, которое необходимо для полученія сыроватаго тѣста.

Переработанное тѣсто кладется въ форму прибора и уплотняется ударною механическою работою копра въ одинъ килограмметр на каждые 10 граммъ сухой смѣси, по совершеніи которой при нормальной густотѣ раствора должно проявиться выдѣленіе изъ подъ формы жидкости.

**Примѣчаніе 3.** Къ приготовленію образцовъ раствора изъ смѣси портландъ-цемента и песка.

Растворъ вколачивается въ форму отъ руки желѣзной лопаткой, вѣсомъ до 250 грам., или деревяннымъ молоткомъ того же вѣса, или же при помощи копрового аппарата, до тѣхъ поръ, пока на поверхности раствора не покажется вода (при уколачиваніи тѣста копромъ, появленіе воды наблюдается въ нижней части формы); тогда излишекъ раствора срѣзывается и поверхность тѣста, заполняющаго форму, выравнивается ножомъ. Добавленіе и вторичное вколачиваніе раствора въ формы не допускается.

Описанный методъ опредѣленія количества воды для цементныхъ растворовъ съ пескомъ и для бетона, разработанный Тетмайеромъ, заслуживаетъ, по мнѣнію Мадюги, особаго вниманія по точности и сравнимости получаемыхъ результатовъ.

Количество воды въ растворѣ, при которомъ оно къ концу трамбованія только что начинаетъ появляться изъ образца, соответствуетъ «пункту насыщенія» образца при данной работѣ трамбованія.

Если къ концу трамбованія вода не выступаетъ, то это указываетъ, что взятое количество воды недостаточно для полученія насыщеннаго раствора. Наоборотъ, если вода

появляется раньше конца трамбованія, то это показываетъ, что взятое количество воды даетъ растворъ пересыщенный.

Опыты, произведенные для выясненія вліянія количества воды на крѣпость и плотность цементнаго раствора показали: 1)

Въ жирныхъ цементныхъ растворахъ при количествѣ воды, соотвѣствующемъ пункту насыщенія, получается наибольшая крѣпость и наибольшая плотность.

Въ тощихъ цементныхъ растворахъ наибольшая крѣпость получается, при количествѣ воды, гораздо меньшемъ того, которое необходимо для насыщенія образца. Наибольшая же плотность почти соотвѣтствуетъ пункту насыщенія.

Въ растворахъ съ мелкимъ пескомъ избытокъ воды оказываетъ гораздо меньшее вліяніе на крѣпость и плотность образцовъ, чѣмъ ея недостатокъ.

Какъ избытокъ воды, такъ и ея недостатокъ оказываютъ вредное вліяніе: на крѣпость раствора съ крупнымъ пескомъ, а также на плотность растворовъ съ крупнымъ и мелкимъ пескомъ.

Въ прилагаемой таблицѣ показано для различнаго состава цементныхъ растворовъ содержаніе воды: 1) при которомъ получается максимальная крѣпость растворовъ; 2) при которомъ она къ концу трамбованія только что начинаетъ появляться.

ТАБЛИЦА № 1.

Песокъ, между ситами съ отверстиями на 1 кв. сантиметръ	144 — 225			16 : 36		
	1 : 2	1 : 3	1 : 5	1 : 2	1 : 3	1 : 5
Пропорціи раствора . . . . .	1 : 2	1 : 3	1 : 5	1 : 2	1 : 3	1 : 5
Содержаніе воды при максимальной крѣпости % . . . . .	8,5	8	7	7,2	6,7	5,5
Содержаніе воды, при условіи ея появленія къ концу трамбованія 0/0 . . . . .	8,7	9,1	9,8	7,3	7,8	8,8

## § 12. Опредѣленіе количества воды для цементныхъ растворовъ посредствомъ теоретическаго разсчета.

Требуемое для цементнаго раствора количество воды при теоретическомъ разсчетѣ составляется изъ двухъ слагаемыхъ:

1) Количества воды, необходимой для образованія тѣста изъ чистаго цемента въ промежуткахъ между песчинками;

2) Количества воды, необходимой для смачиванія поверхности песчинокъ (предполагая, что песчинки непроницаемы для воды).

Количество воды, необходимой для образованія тѣста изъ чистаго цемента въ промежуткахъ между песчинками, опредѣляется, въ зависимости отъ консистенціи тѣста, не одинаковыми способами:

а) для мягкаго тѣста количество воды опредѣляется по «нормальной» густотѣ. Выше были указаны два способа опредѣленія «нормальной густоты» — практическимъ способомъ на «ощупь» и приборомъ Вика-Тетмайера;

б) для жесткаго тѣста (трамбованнаго бетона) количество воды должно соотвѣтствовать той работѣ трамбованія, которую предполагается примѣнить при приготовленіи бетона (раствора). Это количество можетъ быть опредѣлено приблизительно изъ отдѣльныхъ опытовъ надъ тѣстомъ изъ чистаго цемента, подвергая его такой работѣ трамбованія, при какой будетъ готовиться бетонъ (растворъ).

У И. Малюга. Составъ и способъ приготовленія цементнаго раствора и бетона для получения наибольшей крѣпости. Петербургъ. 1895.

Количество воды, необходимой для смачивания поверхности песчинокъ, можетъ быть опредѣлено непосредственнымъ опытомъ надъ пескомъ по разности вѣсовъ сухого и смоченнаго песка. Этотъ способъ даетъ грубые результаты и применимъ только къ очень крупному песку и гравію, такъ какъ при мелкомъ пескѣ вода удерживается еще образующимися между песчинками капиллярами. Чѣмъ мельче песокъ, тѣмъ больше воды удерживается капиллярами.

Второй способъ опредѣленія «воды смачиванія» заключается въ слѣдующемъ. Опредѣляется количество воды, приходящееся на единицу вѣса цемента:

а) при составленіи тѣста изъ чистаго цемента и б) при составленіи раствора съ пескомъ.

Въ этомъ случаѣ получается большій вѣсъ. Разность между обоими вѣсами принимается за то количество воды, которое идетъ на смачиваніе песчинокъ.

Этотъ второй способъ опредѣленія «воды смачиванія» применимъ только въ связи съ какимъ нибудь другимъ способомъ опредѣленія количества воды для раствора.<sup>1)</sup>

Заканчивая описаніе способовъ опредѣленія количества воды для затворенія цементныхъ растворовъ и бетоновъ, можно привести слѣдующіе общіе выводы изъ опытовъ и практики:

1) Опредѣленіе количества воды должно производиться надъ матеріалами, предназначенными для постройки, такъ какъ это количество зависитъ не только отъ соотношенія цемента, песка и гравія, степени крупности песка и гравія, но также и отъ химическаго состава и физическихъ свойствъ этихъ матеріаловъ.

2) Влажный песокъ занимаетъ объемъ большій, чѣмъ сухой. Поэтому, если принять во вниманіе степень влажности песка, будемъ получать болѣе жирный растворъ, чѣмъ требуется. Вліяніе степени влажности песка на измѣненіе пропорціи раствора видно изъ слѣдующихъ опытовъ Фере:

Т А Б Л И Ц А № 2.

Дюнный песокъ	Требуемая пропорція раствора	Пропорція, получаемая при влажномъ пескѣ		Пропорція, которую слѣдуетъ брать при влажномъ пескѣ	
		0,5	5	0,5	5
Содержаніе влажности въ пескѣ %	0	0,5	5	0,5	5
Килогр. цемента	200 килогр. на куб. мт. . .	224 кил.	254 кил.	179 кил.	158 кил.
На куб. мт. песку	1000 " " " " . . .	1119 "	1270 "	895 "	788 "

3) Крѣпость цементнаго раствора (бетона) падаетъ въ меньшей степени при избыткѣ воды (сравнительно съ тѣмъ количествомъ, которое соответствуетъ максимальной крѣпости), чѣмъ при ея недостаткѣ.

4) Растворы и бетоны «мягкой» консистенціи при короткихъ срокахъ тверднѣнія получаютъ меньшую крѣпость, чѣмъ растворы и бетоны «твердой» консистенціи, но при большихъ срокахъ тверднѣнія; первые догоняютъ и даже опережаютъ вторые.

Вліяніе консистенціи раствора (бетона) на крѣпость его видна изъ слѣдующихъ опытовъ Alexandre'a.

<sup>1)</sup> И. Малюга. Составъ и способъ приготовленія цементнаго раствора и бетона для получения наибольшей крѣпости. Петербургъ 1895.

ТАБЛИЦА № 3.

Консистенция раствора	Песок между ситами	Пропорция раствора	Содержание воды 0/0	Крѣпость на разрывѣ			
				7 дней	28 дн.	1 годъ	3 года
Твердая . . . . .	90—110	400 килогр. цемента на 1 куб. мт. песку	14	3,94	5,12	4,86	6,17
Обыкновенная . . . . .			22	3,22	5,17	10,73	11,33
Мягкая . . . . .			30	2,46	3,84	8,81	12,61

И. Малюга<sup>1)</sup> считаетъ, что эти опыты Alexandre'a не вполне применимы къ трамбованнымъ бетонамъ, такъ какъ образцы лишь слабо уколачивались.

Б) На практикѣ, въ большинствѣ случаевъ, употребляется жесткій бетонъ, съ такимъ количествомъ воды, что при концѣ трамбованія влага не появляется. При употребленіи такой «сухой» массы, необходимо, чтобы количество воды было болѣе, чѣмъ достаточно для химическихъ процессовъ твердѣнія цемента.

Необходимое для химическихъ процессовъ твердѣнія цемента количество воды определяется посредствомъ прокаливанія затвердѣвшихъ цементныхъ образцовъ. Образцы передъ пр каливаніемъ должны быть высушены для удаленія, такъ называемой «свободной» гигроскопической воды.

На основаніи такихъ опытовъ было произведено опредѣленіе «химически» связанной воды въ отвердѣвшихъ образцахъ разныхъ возрастовъ:

Фейхтингеръ нашелъ въ цементномъ образцѣ возрастомъ 80 дней 11<sup>1/2</sup>0/0 воды;

Кандло, при изслѣдованіи образцовъ возрастомъ отъ 5-ти до 15-ти лѣтъ, нашелъ въ среднемъ количество химически связанной воды отъ 11<sup>1/2</sup>0/0 до 14,50/0;

И. Малюга<sup>2)</sup> въ своихъ опытахъ, имѣвшихъ совершенно другую цѣль, опредѣлялъ количество химически связанной воды въ образцахъ въ среднемъ 150/0.

Приведенные опыты не могутъ претендовать на большую точность, но они даютъ понятіе о томъ минимальномъ количествѣ воды, до котораго никогда не слѣдуетъ доходить при затвореніи цементныхъ растворовъ, такъ какъ на практикѣ неизбежна потеря воды при испареніи, всасываніи досками формъ и т. д.

### § 13. Отношенія воды въ затвердѣвшемъ портландъ-цементѣ.<sup>3)</sup>

При опредѣленіи въ цементныхъ образцахъ «химически» связанной (гидратной) воды необходимо, какъ указывалось выше, просушить образцы для удаленія «свободной» (гигроскопической) воды.

Посмотримъ, какое соотношеніе между гидратной и гигроскопической водой находится въ твердѣющемъ цементномъ тѣстѣ.

Въ моментъ затворенія раствора вода присутствуетъ, какъ влага-гигроскопическая вода. Съ теченіемъ времени влага переходитъ химически въ гидратную воду. Въ это же время цементъ принимаетъ углекислоту изъ окружающей среды. Для выясненія полной картины процесса твердѣнія проф. Наджи въ Будапештѣ произвелъ слѣдующіе опыты.

Изъ портландъ-цемента, содержащаго 1,270/0 гигроскопической воды, 1,820/0 гидратной воды и 2,520/0 углекислоты, были приготовлены растворы съ 300/0 и 500/0

<sup>1)</sup> Малюга. Составъ и способъ приготовленія цементнаго раствора (бетона) для получения наибольшей крѣпости. Петербургъ 1895 г.

<sup>2)</sup> И. Малюга. Составъ и способъ приготовленія цементнаго раствора (бетона) для получения наибольшей крѣпости. Петербургъ 1895 г.

<sup>3)</sup> Цементъ № 5. 1909 г.

воды. Изъ этихъ растворовъ были приготовлены кубики съ поверхностями въ 50 см.<sup>2</sup> Одни изъ нихъ, спустя 24 часа, хранились подъ водою, а другіе на воздухѣ. Въ теченіе времени кубики пробуравливались. Въ получаемой отъ буренія мукѣ опредѣляли гидратную и гигроскопическую воду и углекислоту.

Результаты опытовъ приведены въ таблицахъ № 4 и № 5 и диаграммахъ № 7 и № 8.

Т А Б Л И Ц А № 4.  
Цементное тѣсто съ 33% воды.

Возрастъ образцовъ (дни)		5	13	35	72	128	187
Гигроскопическая вода (влага)	Храненіе на воздухѣ	24,54	23,18	21,57	13,50	12,18	8,39
	Храненіе въ водѣ	28,61	28,37	27,60	23,58	23,10	22,63
Гидратная вода	Храненіе на воздухѣ	5,06	6,66	7,52	8,02	8,40	8,10
	Храненіе въ водѣ	9,29	9,40	9,62	11,72	12,35	14,50
Углекислота	Храненіе на воздухѣ	4,74	4,80	5,39	5,48	6,17	8,61
	Храненіе въ водѣ	3,38	4,15	5,18	5,27	5,80	6,06

Т А Б Л И Ц А № 5.  
Цементное тѣсто съ 50% воды.

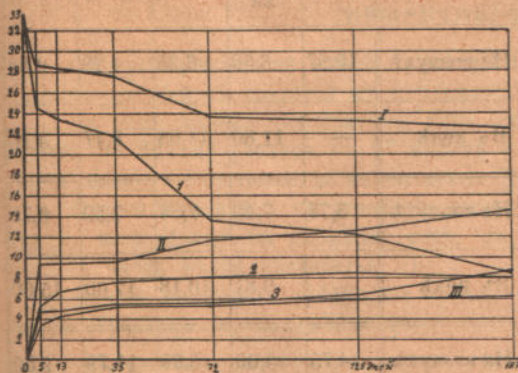
Возрастъ образцовъ (дни)		5	13	35	72	128	187	
Гигроскопическая вода (влага)	Храненіе {	На воздухѣ	38,01	33,24	29,51	15,12	13,12	7,24
		Въ водѣ	43,45	33,17	31,06	27,98	26,85	25,96
Гидратная вода	Храненіе {	На воздухѣ	10,76	10,90	11,15	12,65	12,95	12,12
		Въ водѣ	11,70	11,90	12,25	14,25	14,70	14,89
Углекислота	Храненіе {	На воздухѣ	3,10	5,88	6,18	6,22	7,02	9,73
		Въ водѣ	2,54	5,55	6,12	7,15	7,30	7,49

Изъ таблицъ № 4 и № 5 и диаграммъ № 7 и № 8 слѣдуетъ:

1) Какъ на воздухѣ, такъ и подъ водою образцы съ теченіемъ времени постепенно теряютъ свою гигроскопическую воду, а затвердѣвшій цементъ благодаря этому дѣлается суше;

2) Въ твердѣющемъ цементномъ растворѣ гидратная вода и углекислота вообще увеличиваются.

Исключеніе изъ этого вывода представляютъ, повидимому, цементы, твердѣющіе на воздухѣ: какъ видно изъ таблицъ, 187-дневные образцы показываютъ менѣ гидратной воды, чѣмъ 128 дневные.



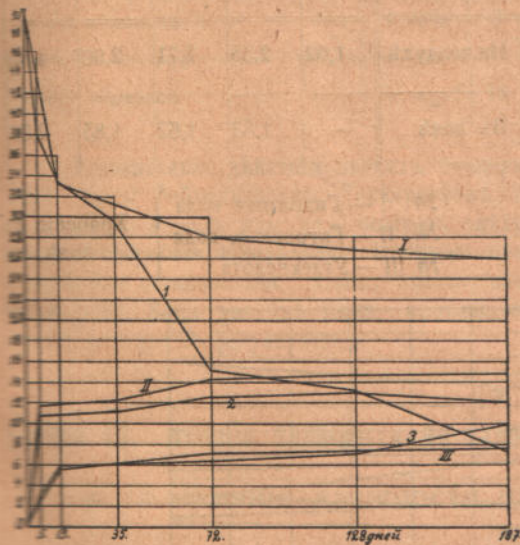
Фиг. 7.

№ 1 — Гигроскоп. вода  
 № 2 — Гидратная вода  
 № 3 — Углекислота

Храненіе на  
 воздухѣ.

№ I — Гигроскоп. вода  
 № II — Гидратная вода  
 № III — Углекислота

Храненіе въ  
 водѣ.



Фиг. 8.

№ 1 — Гигроскоп. вода  
 № 2 — Гидратная вода  
 № 3 — Углекислота

Храненіе на  
 воздухѣ.

№ I — Гигроскоп. вода  
 № II — Гидратная вода  
 № III — Углекислота

Храненіе въ  
 водѣ.

Чтобы выяснитъ, не есть ли послѣднее явленіе случайное, были поставлены новые опыты. Для опытовъ былъ взятъ порландъ-цементъ, содержащій 0,63% влаги, 0,77% гидратной воды и 0,83% углекислоты. Изъ этого цемента былъ приготовленъ растворъ съ 20% воды. Изъ тѣста были приготовлены небольшіе шарики — вѣсомъ въ 20 грамм. Одни изъ нихъ хранились на воздухѣ, а другіе, послѣ 24 часовъ твердѣнія на воздухѣ, хранились въ открытые сосуды подъ воду. Для изслѣдованій шарики вынимались по одному, высушивались при  $t = 100^{\circ}$  до неизмѣняемости въ вѣсѣ, измѣлялись въ порошокъ, порошокъ прокаливался, и опредѣлялись гидратная вода и углекислота. Данные этихъ опытовъ введены въ таблицу № 6 и предъставлены на діаграммѣ № 9. Эти опыты, подтверждая данныя предыдущихъ, показали:

ТАБЛИЦА № 6.  
Цементное тѣсто съ 20% воды.

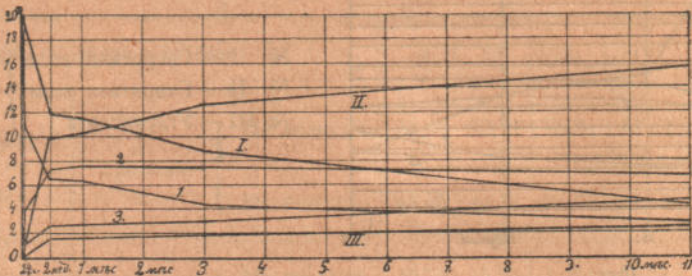
Возрастъ образцовъ		24 часа	2 недѣ- ли	1 мѣсяц.	3 мѣсяц	11 мѣсяц	
Гигроскопическая вода (влага)	Храненіе	На воздухѣ	10,97	6,50	6,35	4,29	2,84
		Въ водѣ	—	11,80	11,65	8,77	4,10
Гидратная вода	Храненіе	На воздухѣ	3,78	7,19	7,64	7,50	6,75
		Въ водѣ	—	9,81	10,18	12,69	15,60
Общая вода	Храненіе	На воздухѣ	14,75	13,60	13,99	11,79	9,59
		Въ водѣ	—	21,61	21,83	21,56	19,70
Углекислота	Храненіе	На воздухѣ	1,02	2,55	2,71	2,80	4,55
		Въ водѣ	—	1,53	1,62	1,85	2,35

№ 1. — Гигроскоп. вода  
№ 2. — Гидратная вода  
№ 3. — Углекислота

Храненіе на  
воздухѣ.

№ I. — Гидратная вода  
№ II. — Гигроскоп. вода  
№ III. — Углекислота

Храненіе въ  
водѣ.



Фиг. 9.

- 1) что гидратная вода въ образцахъ, твердѣющихъ въ водѣ, возрастаетъ, въ образцахъ же, твердѣющихъ на воздухѣ, она, достигнувъ своего максимума, снова уменьшается.
- 2) Затвердѣвшій цементъ, какъ на воздухѣ такъ и подъ водой, теряетъ свою влагу т. е. дѣлается суше.
- 3) Химическое состояніе отвердѣвшихъ портланд-цементовъ не устанавливается и спустя 11 мѣсяцевъ (на большіе сроки опытъ не ставился;
- 4) Химическіе процессы — принятіе гидратной воды и углекислоты — обуславливаютъ увеличеніе объема, что однако не сопровождается вредными дѣйствіями. Это обстоятельство можно объяснить тѣмъ, что увеличеніе объема — явленіе молекулярнаго ха-

рактора, а именно увеличивающіяся молекулы заполняютъ поры тѣла и вытѣсняютъ оттуда гигроскопическую воду. Этимъ объясняется также высыхание образцовъ подъ водой, гдѣ обь испареніи, конечно, не можетъ быть и рѣчи.

## § 14. Вліяніе температуры воды на схватываніе и твердѣніе цементнаго раствора.

Общепризнанное мнѣніе о вліяніи температуры воды на схватываніе и твердѣніе раствора въ общемъ сводится къ слѣдующему.

Съ повышеніемъ температуры воды, схватываніе и вообще процессъ твердѣнія ускоряется. По Лямину разниця въ 5° можетъ ускорить схватываніе въ 1½ раза, а при 60° всякій цементъ схватывается моментально<sup>1)</sup>.

Однако Михаэлисъ на основаніи своихъ опытовъ находитъ, что порландскій цементъ, затворенный на кипящей водѣ, застываетъ не скорѣе обыкновеннаго и даетъ тѣло съ очень малой прочностью.<sup>2)</sup>

Кандло наблюдалъ слѣдующее время схватыванія при разныхъ температурахъ въ двухъ образцахъ порландъ-цемента

Температура	7°	15°	20°	25°	30°	35°
I-й образецъ . . . . .	4 часа	3 часа	2 ч. 18 м.	25 мин.	10 мин.	мгнов.
II-й образецъ . . . . .	28 мин.	14 мин.	10 мин.	9 мин.	8 мин.	мгнов.

Относительно дѣйствія низкихъ температуръ на процессъ твердѣнія были произведены опыты Фейхтингеромъ, Диккергофомъ, Кандло, Беме и др.

Общій выводъ изъ ихъ опытовъ слѣдующій: при пониженіи температуры схватываніе и твердѣніе замедляются. Процессъ при температурахъ ниже (—10° Ц.) можетъ даже совершенно остановиться, чтобы, однако, снова начаться при повышеніи температуры выше нуля. Какъ увидимъ ниже, произведенные нами опыты съ горячей водой дали совершенно другіе результаты.

## ГЛАВА IV. Вліяніе влажности на схватываніе и твердѣніе раствора и бетона.

### § 15. Вліяніе влажности на твердѣющіе растворы.<sup>3)</sup>

Какъ цементный растворъ, такъ и инертныя составныя части бетона: песокъ, гравій, щебень—измѣняются въ объемѣ, увеличиваясь во влажной средѣ, и уменьшаясь при высушиваніи.

Шуманъ<sup>4)</sup>, производившій опыты надъ измѣненіемъ длины брусковъ изъ различныхъ строительныхъ камней, даетъ слѣдующія среднія относительныя измѣненія длины, при храненіи брусковъ въ теченіе 2-хъ недѣль въ водѣ и на воздухѣ.

Данныя таблицы относятся къ матеріаламъ, подвергавшимся вліянію среды въ теченіе 2-хъ недѣль, для болѣе продолжительнаго времени измѣненія объемовъ могутъ представлять данныя таблицы.

<sup>1)</sup> Леминъ. Основныя свойства порландъ-цемента.

<sup>2)</sup> Любавинъ. Техническая химія Т. II стр. 492.

<sup>3)</sup> Бетонъ и бетонныя работы. Житкевичъ 1912 г.

<sup>4)</sup> Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen, 1905 г.



ТАБЛИЦА № 7.

Материалы	Относительныя удлиненія въ водѣ ( $\frac{e'-e}{e}$ )	Относительная усушка на воздухѣ ( $\frac{e-e'}{e}$ )
Кирпичъ . . . . .	0,00013	0,00011
Песчаники . . . . .	0,00065	0,00065
Известняки . . . . .	0,00012	0,00013
Базальты . . . . .	0,00034	0,00038
Гранитъ . . . . .	0,00006	0,00015

Измѣненіе объемовъ твердѣющихъ въ водѣ или на воздухѣ цементныхъ растворовъ представляется явленіемъ болѣе сложнымъ. Измѣненіе объема является алгебраическою суммой измѣненій, вызываемыхъ слѣдующими причинами: 1) химическій процессъ тверднѣнія цемента, продолжающійся нѣсколько лѣтъ; 2) общій физическій законъ, вступающій въ дѣйствіе по мѣрѣ тверднѣнія раствора.

Грантъ и Диккергофъ, производившіе опыты надъ измѣненіями объема цементныхъ растворовъ, пришли къ слѣдующимъ общимъ выводамъ:

- 1) всѣ цементы болѣе или менѣе увеличиваются въ объемѣ при тверднѣніи въ водѣ;
- 2) увеличеніе объема хорошихъ цементовъ настолько ничтожно, что не имѣетъ особаго практическаго значенія;
- 3) измѣненіе объема уменьшается по мѣрѣ увеличенія количества песка въ растворѣ;
- 4) увеличеніе объема наибольшее для цементовъ съ избыткомъ извести и слабообожженныхъ;
- 5) увеличеніе объема наибольшее у свѣжихъ цементовъ и наименьшее у выдержанныхъ;
- 6) увеличеніе объема возрастаетъ по мѣрѣ прибавленія гипса.

Шуманъ <sup>1)</sup> производилъ въ теченіе года опыты надъ образцами изъ чистаго цементнаго раствора и раствора—1 часть цемента + 3 части песку.

Образцы были приготовлены изъ 10 различныхъ цементовъ и сохранялись въ водѣ. Среднія относительныя удлиненія приведены въ прилагаемой таблицѣ.

ТАБЛИЦА № 8.

Составъ раствора	Сроки тверднѣнія въ водѣ, недѣли					
	1	4	13	26	39	52
Чистый цементъ . . . . .	0,00048	0,00082	0,00104	0,00125	0,00125	0,00139
Растворъ 1:3 . . . . .	0,00015	0,00021	0,00024	0,00028	0,00030	0,00033

Данныя таблицы представлены на діаграммѣ № 10.

Изъ таблицы № 8 и діаграммы № 10 видно:

- 1) Среднія величины относительныхъ удлиненій для растворовъ 1:3, при тверднѣніи въ водѣ, почти въ 4 раза меньше относительныхъ удлиненій растворовъ изъ чистаго цемента;

<sup>1)</sup> Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen, 1905 г.

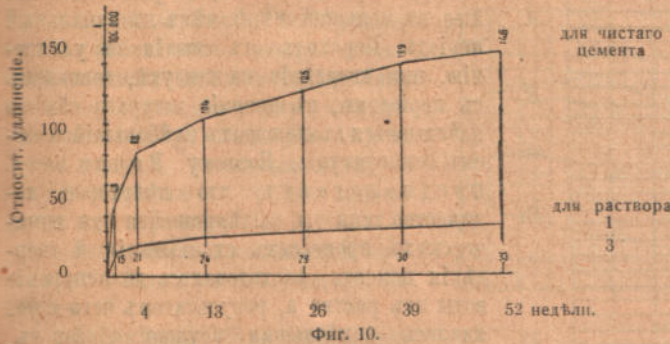
2) наибольшія расширенія относятся къ начальнымъ моментамъ схватыванія и тверднїи;

3) медленно схватывающіеся цементы даютъ наименьшія измѣненія объема.

Консидеръ производилъ опыты въ теченіе 63 дней надъ образцами длиною 60 см.,

сѣченіемъ  $6 \times 2,5$  см.<sup>2</sup> Образцы приготавливались группами изъ чистаго цемента и раствора 1:3 (600 кил. цемента на 1 куб. мт. песка). Въ одинъ изъ образцовъ каждой группы былъ втрамбованъ по оси призмы желѣзный стержень, круглаго сѣченія діаметромъ 1,02 см.

Точныя измѣренія, произведенныя Консидеромъ, показали:



1) всѣ образцы расширялись при тверднїи въ водѣ и сжимались на воздухѣ;

2) приращенія измѣненій объема уменьшались съ теченіемъ времени.

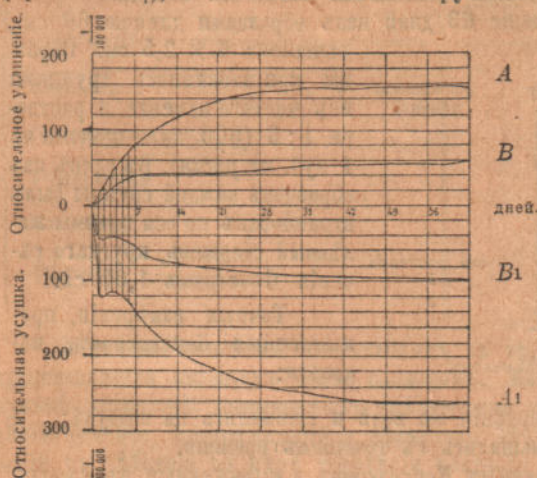
Линейныя измѣренія образцовъ, полученныя Консидеромъ и выраженныя въ сотыхъ частяхъ миллиметра на 1 пог. мт. длины призмъ, приведены въ таблицѣ 1) № 9.

ТАБЛИЦА № 9.

№ образцовъ.	Дни	Удлиненія при тверднїи въ водѣ															
		1	2	3	4	5	6	7	14	21	28	35	42	49	56	63	
1	Цементъ безъ желѣза .	7	5	21	27	32	37	41	59	69	73	75	77	78	78	79	
2	Цементъ съ желѣзомъ .	2	3	4	5	6	8	9	13	16	18	20	21	22	22	22	
3	Цементный растворъ (1:3) безъ желѣза .	3	10	13	15	17	18	19	20	22	24	26	27	27	27	28	
4	Тоже съ желѣзомъ .	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	
		Усадка при тверднїи на воздухѣ:															
5	Цементъ безъ желѣза .	60	58	57	58	60	64	70	95	110	118	123	128	130	131	132	
6	Цементъ съ желѣзомъ .	6	9	12	14	16	17	20	22	23	24	25	25	25	25	25	
7	Цементный растворъ (1:3) безъ желѣза .	22	21	20	21	22	26	29	38	42	44	45	47	47	49	50	
8	Тоже съ желѣзомъ .	4	6	7	8	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	

На прилагаемой диаграммѣ (№ 11) представлены данныя таблицы для образцовъ безъ желѣза для болѣе яснаго представленія объ измѣненїи объема при тверднїи на воздухѣ и въ водѣ. Кривыя  $OA$  и  $OA_1$  — для раствора изъ чистаго цемента; кривыя  $OB$  и  $OB_1$  для раствора 1:3 (600 кил. цемента на 1 куб. метръ песка).

Чистый цементный раствор, схватившийся через 12 часовъ, въ периодъ схватыванія между 6 и 10 часами на воздухѣ, далъ наибольшее относительное сжатіе 0,00060 (кривая OA<sub>1</sub>), послѣ чего было обнаружено незначительное удлиненіе, продолжавшееся



Фиг. 11.

въ теченіе 3-хъ дней твердѣнія, затѣмъ опять наступило сжатіе, но уже возрастающее въ меньшей мѣрѣ чѣмъ въ начальный періодъ. Переходъ отъ сжатія къ удлинению, при твердѣніи на воздухѣ, совпадалъ съ періодомъ, въ теченіе котораго обычно наблюдается въ образцахъ наибольшій подъемъ температуры. Поэтому Консидеръ предполагаетъ, что нѣкоторое количество теплоты, выдѣлявшейся при химическихъ процессахъ схватыванія и твердѣнія цемента, расходовалось на испареніе воды изъ раствора, результатомъ чего и появилась наибольшая усушка образцовъ, оставшіяся въ образцѣ избытокъ теплоты обнаруживался въ повышеніи температуры образца, а это обстоятельство вызывало соответственное удлиненіе его. Такимъ образомъ, явленіе непрерывнаго сжатія, обусловливавшегося общимъ физическимъ закономъ для твердыхъ тѣлъ, подверженныхъ усушкѣ на воздухѣ, маскировалось расширеніемъ, явившимся слѣдствіемъ химической реакціи.

Такое явленіе продолжалось до тѣхъ поръ, пока внутренняя температура образца не сравнялась съ температурой окружающаго воздуха; послѣ чего физическій процессъ сжатія продолжался нормально.

Консидеръ, на основаніи своихъ болѣе продолжительныхъ опытовъ, а также опытовъ Мейера и Шумана въ Германіи, даетъ слѣдующія возможные величины относительныхъ удлиненій и сжатій: <sup>1)</sup>

1) При твердѣніи въ водѣ образцы изъ чистаго цемента обнаруживаютъ относительныя удлиненія: къ концу перваго мѣсяца 0,0005 (т. е. 0,5 мил. на 1 пог. метръ), къ концу перваго года — не менѣе 0,001 и къ концу втораго или третьяго года — отъ 0,0015 до 0,002 (т. е. отъ 1,5 до 2,0 мил. на 1 метръ).

2) При тѣхъ же условіяхъ растворы изъ 600 кил. цемента на 1 куб. метръ песка (1:3) даютъ относительныя удлиненія почти въ три раза меньшія, чѣмъ образцы изъ чистаго цемента.

3) При твердѣніи на воздухѣ образцы изъ чистаго цемента обнаруживаютъ, спустя нѣсколько часовъ послѣ затворенія, относительное сжатіе до 0,0005 (т. е. 0,5 мил. на 1 метръ), къ концу двухъ или трехгодичнаго срока наибольшія относительныя усушки ихъ отъ 0,0015 до 0,002 (т. е. 1,5—2 мил. на 1 метръ).

4) Для тощихъ растворовъ и бетоновъ относительная наибольшая усушка изменяется отъ 0,0003 до 0,0005, т. е. въ 4—5 разъ меньше, чѣмъ для образцовъ изъ чистаго цемента.

5) Въ отвердѣвшихъ растворахъ вліяніе влажности на измененіе ихъ объема не возрастаетъ съ увеличеніемъ количества цемента.

Въ Германіи были произведены опыты надъ измененіемъ объема цементныхъ растворовъ при твердѣніи въ теченіе болѣе продолжительнаго времени.

Опыты производились надъ образцами изъ 30 различныхъ цементовъ <sup>2)</sup>, при чемъ

<sup>1)</sup> Докладъ Консидера на конгрессъ Международнаго Общества испытанія матеріаловъ въ Будапештѣ, 1912 г.

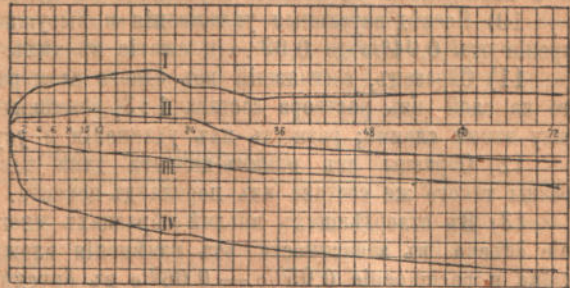
<sup>2)</sup> Protocol der Verhandlung des Vereins Deutsch. Portland-Zement Fabricanten, 192 г. стр. 120.

26 из них вполне удовлетворяли нормам, а цементы остальных 4-х заводов содержали магнезии от 3,5% до 4,08%, т. е. больше полагающагося по немецким нормам.

На прилагаемой фигурѣ № 12 изображена типичная диаграмма наблюдаемыхъ измѣненій при твердѣніи въ водѣ и на воздухѣ.

Ломанныя линіи (I и IV) выражаютъ зависимость между вѣсѣмъ и относительными удлиненіями и сжатіями для образцовъ изъ чистаго цемента при твердѣніи въ водѣ и на воздухѣ; ломанныя линіи (II и III) выражаютъ ту же зависимость для образцовъ (1:3).

Результаты изслѣдованій привели въ общемъ къ слѣдующимъ выводамъ.



Фиг. 12.

1) Измѣненіе объемовъ при твердѣніи цементныхъ растворовъ въ водѣ и на воздухѣ въ первые сроки твердѣнія происходили согласно описанныхъ выше опытовъ.

2) Всѣ образцы, по истеченіи нѣкотораго времени, обнаружили при твердѣніи въ водѣ переходъ отъ расширенія къ сжатію. Въ образцахъ изъ чистаго цемента этотъ переходъ обнаружился въ концѣ 20-го мѣсяца, а для раствора (1:3) — къ концу 12-го мѣсяца.

3) Всѣ образцы состава (1:3) при твердѣніи въ водѣ, какъ видно изъ диаграммы, перешли послѣ года отъ расширенія къ сокращенію, по истеченіи 2-хъ, 3-хъ лѣтъ возвратили первоначальное положеніе и далѣе, пройдя черезъ нуль диаграммы, перешли къ сокращенію.

4) Образцы, твердѣвшіе на воздухѣ, какъ изъ чистаго цемента, такъ и изъ раствора 1:3 (ломанныя III и IV), показывали непрерывное увеличеніе сжатія въ теченіе 6 лѣтъ.

5) Разности ординатъ ломанныхъ (I) и (IV), а также (II) и (III) выражаютъ графически предѣлы возможныхъ наибольшихъ линейныхъ измѣненій въ данные сроки при твердѣніи въ водѣ и на воздухѣ. Для растворовъ съ пескомъ эти предѣльныя измѣненія гораздо меньше, чѣмъ для растворовъ изъ чистаго цемента; онѣ возрастаютъ въ началѣ сроковъ твердѣнія; по истеченіи 2-хъ лѣтъ предѣлы эти для растворовъ съ пескомъ суживаются (ломанныя II и III), а для растворовъ изъ чистаго цемента расширяются (ломанныя I и IV).

Произведенныя по этому вопросу изслѣдованія въ Америкѣ<sup>1)</sup> въ общемъ сводятся къ слѣдующимъ общимъ выводамъ.

Растворы изъ чистаго цемента.

1) При твердѣніи образцовъ изъ чистаго цемента въ водѣ наблюдалось расширеніе послѣ одного года отъ 0,07% до 0,15%.

2) Въ промежуткѣ отъ 1 года до 4-хъ лѣтъ не было обнаружено расширенія въ тѣхъ же образцахъ.

3) При высушиваніи образцовъ, пролежавшихъ въ водѣ 3 года, получалось сжатіе отъ 0,13% до 0,15%.

4) Смачиваніе тѣхъ же образцовъ давало снова расширеніе отъ 0,13% до 0,17%.

5) При выдерживаніи образцовъ изъ чистаго цемента на воздухѣ получилась усушка въ теченіе 3-го мѣсяца отъ 0,14% до 0,28%.

6) Къ концу 1-го года усушка доходила до 0,18% и 0,34%.

7) Наблюдалась дальнѣйшая незначительная усушка до конца 4-го года.

<sup>1)</sup> Engineering News, 1911 г., Vol. 66, стр. 29.

Растворы 1:3.

8) При твердннн въ водѣ получалось расширеніе отъ 0,01<sup>0</sup>/<sub>0</sub> до 0,05<sup>0</sup>/<sub>0</sub>; при чемъ наибольшія измѣненія наблюдались въ теченіе нѣсколькихъ первыхъ недѣль.

9) При твердннн на воздухѣ получалась усушка—0,06<sup>0</sup>/<sub>0</sub>—0,09<sup>0</sup>/<sub>0</sub> съ наибольшимъ измѣненіемъ въ теченіе первыхъ 3-хъ мѣсяцевъ.

10) Последъ вательныя увлажненія и высушиванія вызывали соответственныя: расширение отъ 0,04<sup>0</sup>/<sub>0</sub> до 0,09<sup>0</sup>/<sub>0</sub> и сжатіе въ тѣхъ же предѣлахъ.

11) Образецъ, состоявшій изъ одного слоя раствора изъ чистаго цемента, уложеннаго на слой изъ раствора состава 1:3, измѣнялся въ объемѣ безъ нарушенія связи между этими слоями; разность ихъ удлиненія и усушки измѣнялась отъ 0<sup>0</sup>/<sub>0</sub> до 0,15<sup>0</sup>/<sub>0</sub>.

12) Образцы изъ романъ-цемента дали вдвое большія измѣненія объема, чѣмъ образцы такого же состава изъ порландъ-цемента.

13) Въ отвердѣвшихъ вполне образцахъ многолѣтняго возраста наблюдается измѣненіе объема въ зависимости отъ измѣненія влажности. Такъ, напримѣръ, получились усушка и расширеніе 0,05<sup>0</sup>/<sub>0</sub> — 0,06<sup>0</sup>/<sub>0</sub> въ брускѣ, выпиленномъ изъ бетонной панели, прослужившей 20 лѣтъ.

### § 16. Вліяніе влажности на твердѣющіе бетоны.

Мы рассмотрѣли вліяніе влажности на твердѣющіе цементные растворы. Посмотримъ, какое вліяніе оказываетъ влажность на твердѣющіе бетоны. По этому вопросу имѣются слѣдующія данныя опытовъ <sup>1)</sup>.

ТАБЛИЦА № 10.

Вѣсъ цемента въ 1 куб. метрѣ смѣси, килогр.:	150		300		450	
	А	В	А	В	А	В
Марка цемента						
Усадка при твердннн на воздухѣ:						
4 дня . . . . .	0,0105	0,0042	0,0012	0,0063	0,0135	0,0003
7 дней . . . . .	0,0195	0,0123	0,0093	0,0105	0,0054	0,0111
28 „ . . . . .	0,0378	0,0351	0,0357	0,0330	0,0465	0,0390
84 „ . . . . .	0,0393	0,0639	0,0342	0,0312	0,0453	0,0390
10 „ . . . . .	0,0285	0,0309	0,0327	0,0321	0,0426	0,0393
1 годъ . . . . .	0,0414	0,0414	0,0420	0,0429	0,0591	0,0558
1,5 года . . . . .	0,0417	0,0402	0,0408	0,0378	0,0543	0,0504
Удлиненіе при твердннн въ водѣ:						
4 дня . . . . .	0,0006	0,0009	0,0063	0,0048	0,008	0,0015
7 дней . . . . .	0,0027	0,0033	0,0150	0,0069	0,0054	0,0087
28 „ . . . . .	0,0000	0,0021	0,0150	0,0057	0,0096	0,0024
84 „ . . . . .	0,0045	0,0042	0,0093	0,0093	0,0171	0,0177
210 „ . . . . .	0,0039	0,0003	0,0174	0,0111	0,0276	0,0207
1 годъ . . . . .	0,0042	0,0003	0,0207	0,0129	0,025	0,0186
1,5 года . . . . .	0,0039	0,0015	0,0201	0,0122	0,0225	0,0270

<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ, 1912 г.

Профессоръ Шюлле испытывалъ образцы изъ бетона состава: 1 часть песка, 2 части щебня разнѣромъ отъ 8 до 12 миллим., цемента на кубическій метръ смѣси: 150, 300 и 450 кил.

Полученныя относительныя усушки при твердѣніи на воздухѣ и относительныя расширенія при твердѣніи въ водѣ выражены въ процентахъ и приведены въ таблицѣ № 10.

Въ 1' Ecole des Ponts et Chaussées было произведено испытаніе <sup>1)</sup> надъ образцами состава: 300 килогр. поргладъ-цемента на 1 куб. метръ смѣси: 0,4 куб. метр. песка, просѣянаго черезъ сито съ отверстіями  $d = 0,5$  сант. и 0,8 куб. метр. гравія, прошедшаго черезъ сито съ отверстіями  $d = 2,5$  сант.

Усушка опредѣлилась въ процентахъ:

Черезъ	3	12	30	47	93	147 дней
	0,00	0,011	0,021	0,022	0,034	0,039

Приведенные опыты, а также и другія произведенныя въ этомъ направленіи изслѣзованія показали: <sup>1)</sup>

1) Для цѣлей практики могутъ быть приняты слѣдующія величины линейныхъ измѣненій бетона при твердѣніи на воздухѣ

ТАБЛИЦА № 11.

Сроки мѣсяцевъ:	1	3	12	18
Усушка %				
Наибольшая . . . . .	0,036	0,052	0,052	0,054
Наименьшая . . . . .	0,022	0,034	0,040	0,042
Средняя . . . . .	0,029	0,043	0,046	0,048

2) Усушка уменьшается съ увеличеніемъ количества воды, взятаго для затворенія бетона.

3) Усушка уменьшается по мѣрѣ отощенія бетоновъ. Такъ, по даннымъ опытовъ Goldbeck'a, усушка бетонныхъ образцовъ состава 1 : 3 : 6 составляла 0,9 усушки бетонныхъ образцовъ состава 1 : 2 : 4; усушка образцовъ бетона, содержащихъ 150 кил. цемента на 1 куб. метр., равнялась 0,77 усушки образцовъ, содержащихъ 450 кил. цемента на 1 куб. метр.

4) При твердѣніи бетонныхъ образцовъ въ водѣ, на расширеніе ихъ вліяетъ существенно количество цемента въ бетонѣ. Такъ, расширеніе образцовъ, содержащихъ 150 килогр. цемента на 1 куб. метръ смѣси, составляло только 20% расширенія образцовъ, содержащихъ 450 килогр. цемента въ 1 куб. метрѣ смѣси; тогда какъ при твердѣніи на воздухѣ усушка образцовъ изъ тощаго бетона составляла 80% усушки образцовъ изъ жирнаго бетона.

## § 17. Вѣроятныя причины вліянія влажности на твердѣющіе растворы и бетоны.

Какъ показали наблюденія надъ существующими бетонными сооружениями, приведенные выше результаты лабораторныхъ опытовъ вполне совпадаютъ съ результатами практики.

Причины измененія объема твердѣющихъ цементныхъ растворовъ и бетоновъ подъ влияніемъ влажности не изучены въ достаточной степени, какъ не изучены и процессы твердѣнія цемента. Нѣтъ строго обоснованныхъ научно теорій, объясняющихъ это явленіе; существуютъ только гипотезы, такъ или иначе объясняющія это явленіе. То обстоятельство, что измененія объема подъ влияніемъ влажности, постепенно развиваясь, продолжаютъ въ теченіе многихъ лѣтъ, на ряду съ процессомъ твердѣнія цементнаго раствора, указываетъ на связь этихъ явленій. Какъ указывалось выше, схватываніе и твердѣніе цемента сводится къ дѣйствию воды на минераль цементъ алитъ; этотъ минераль, разлагаясь, даетъ два новообразованія: одно изъ нихъ—гидратъ окиси кальція  $[Ca(OH)_2]$ —кристаллизуется въ массѣ цемента немедленно и на измененіе объема цемента влияния, повидимому, не имѣетъ, второе—сложное химическое соединеніе, главную массу котораго составляетъ водный однокальціевый силикатъ  $(SiO_2 \cdot CaO \cdot 2,5H_2O)$ , по Михаэлису, вещество коллоидальное.

Это вещество, съ теченіемъ времени, тоже переходитъ въ кристаллическое видоизмененіе, но очень медленно. Коллоиды при избыткѣ воды увеличиваются въ объемѣ, съ уменьшеніемъ влаги—сокращаются въ объемѣ. Поэтому съ большой вѣроятностью можно предположить, что и измененія объема растворовъ находятся въ зависности отъ этого явленія. Алитъ подъ влияніемъ воды разлагается сначала довольно быстро, но потомъ обволакивающей зерно алита слой коллоида препятствуетъ проникновенію влаги внутрь, и процессъ разложенія алита дѣлается все медленѣе. Тернебомъ, какъ указывалось выше, нашель неразложившіяся зерна алита въ цементномъ образцѣ, пробывшемъ 20 лѣтъ подъ водой. Количество коллоидовъ въ твердѣющемъ цементномъ растворѣ находится въ нѣкоторомъ неустойчивомъ положеніи: часть его переходитъ въ кристаллическую форму, но за то убыль эта пополняется отъ непрерывно происходящаго разложенія алита. Но послѣдній процессъ постепенно съ теченіемъ времени замираетъ, тогда какъ кристаллизація коллоида идетъ болѣе нормально. Отсюда можно заключить, что количество коллоида въ твердѣющемъ растворѣ постепенно уменьшается. Слѣдовательно уменьшается и его влияние на измененіе объема цементовъ.

Изображенная нами картина влияния коллоидовъ на измененіе объема твердѣющаго раствора подъ влияніемъ влажности вполне соответствуетъ диаграммѣ измененія объема раствора, изображенной на фигурахъ №№ 11 и 12.

Вторымъ факторомъ, несомнѣнно влияющимъ на измененіе объема цементныхъ растворовъ и бетоновъ, является физическій процессъ—измененіе объема инертныхъ составныхъ частей подъ влияніемъ влажности. Этотъ процессъ идетъ въ томъ же направленіи, что и въ растворахъ. Но физическій процессъ, въ объемѣ, имѣетъ, по нашему мнѣнію, меньше значенія, чѣмъ химическій; чѣмъ и можно объяснить, что, съ уменьшеніемъ количества цемента въ растворѣ, конечныя наблюдаемыя—расширеніе и усушка—уменьшаются.

## § 18. Внутреннія напряженія въ твердѣющихъ растворахъ и бетонахъ.

Въ таблицѣ № 9 приведены измененія объема цементныхъ образцовъ со вложеннымъ въ нихъ желѣзомъ при твердѣніи на воздухѣ и подъ водой. Какъ видно изъ таблицы, образцы №№ 2, 4, 6 и 8 обнаружили въ 4—5 разъ меньшія измененія объема, чѣмъ образцы такіе же, но безъ желѣза.

Это явленіе объясняется слѣдующимъ образомъ. Цементный растворъ, окутывая желѣзо, прочно сдѣлается съ нимъ по всей поверхности стержня. При малѣйшемъ измененіи объема раствора, на поверхности стержня появляются силы сдѣлденія, препятствующія этому. Но въ самомъ стержнѣ появляются, благодаря этому, усилія, стремящіяся произвести измененія объема его. Эти измененія такого же знака, какъ и измененія бетона, т. е. при усушкѣ бетона сокращается и стержень и, наоборотъ, при рас-

ширени бетона удлиняется и стержень. Отсюда слѣдуетъ, что видимая деформация желѣзобетоннаго образца зависитъ отъ упругихъ свойствъ желѣза и окружающаго его раствора (или бетона).

Противодѣйствуя расширенію цементнаго раствора (бетона), желѣзный стержень тѣмъ самымъ вызываетъ въ немъ сжимающія усилія, а самъ растягивается. Наоборотъ, при усадкѣ цементнаго раствора (бетона), въ немъ получаютъ растягивающія усилія, а стержень сжимается.

Для выясненія величинъ напряженій въ растворѣ и желѣзѣ при данныхъ явленіяхъ, Консидеръ сдѣлалъ слѣдующій опытъ. Была приготовлена желѣзобетонная призма сѣченіемъ  $6 \times 2,5$  кв. сантим. съ желѣзнымъ стержнемъ діаметромъ 10,2 миллим.; она окраннылась въ водѣ въ теченіе 10 мѣсяцевъ. Послѣ чего была измѣрена длина стержня два раза: первый разъ— послѣ извлеченія образца изъ воды и второй разъ— въ моментъ, когда былъ отбитъ весь растворъ, окружавшій стержень и препятствовавшій ему принять свою первоначальную длину.

Опредѣливъ укороченіе стержня и умноживъ его на коэффициентъ упругости желѣза, Консидеръ опредѣлилъ, что:

въ желѣзѣ должно было получиться растяженіе 12 килогр. на кв. миллим., а въ растворѣ— сжатіе 69,1 килогр. на кв. сантим.

Бахъ производилъ опыты<sup>1)</sup> для опредѣленія величинъ напряженій въ желѣзѣ въ растворѣ при тверднѣніи на воздухѣ.

Были приготовлены бетонныя призмы поперечнаго сѣченія  $20 \times 20$  сантим., длиною 1 метръ, безъ желѣза и съ желѣзнымъ стержнемъ діаметромъ 2 сантим., расположеннымъ по оси призмы. Составъ бетона былъ взятъ такой: 1 часть портландъ-цемента на 4 части смеси изъ песка и гравія. Послѣ годичнаго срока тверднѣнія на воздухѣ обнаружилось сжатіе: въ образцѣ безъ желѣза— 0,41 миллим., въ образцѣ съ желѣзомъ— 0,205 миллим.

Откуда: сжимающее усиліе въ желѣзѣ:

$$R = \frac{0,205}{1000} \times 2.100.000 = 430 \text{ килогр. на кв. сантим.}$$

растягивающее усиліе въ бетонѣ:

$$R_1 = \frac{\pi d^2 \cdot 430}{4 \cdot (20 \times 20 - \frac{\pi d^2}{4})} = 3,4 \text{ килогр. на кв. сантим.}$$

Такимъ образомъ приходимъ къ заключенію, что въ желѣзобетонныхъ конструкціяхъ, при тверднѣніи на воздухѣ и подъ водой, появляются скрытыя внутреннія напряженія разныхъ знаковъ, какъ въ арматурѣ, такъ и въ бетонѣ.

Такія же внутреннія напряженія возникаютъ и въ бетонныхъ конструкціяхъ безъ желѣза, если на отвердѣвшій слой бетона улжить новый. Для подтвержденія этого обстоятельства Консидеръ сдѣлалъ такой опытъ: призма, приготовленная изъ чистаго цементнаго раствора шириною 30 сантим., черезъ 3 дня была наращена по высотѣ слоемъ тоже изъ чистаго цемента (фиг. № 13).

По плоскости соединенія *AB* черезъ нѣкоторое время появились въ верхнемъ слой трещины, которыя къ концу года стали замѣтны для невнукаго глаза. Въ данномъ случаѣ измѣненію объема новаго верхняго слоя препятствовалъ уже окрѣпшій и деформировавшійся нижній слой, такъ какъ по плоскости соприкасанія появились силы сѣпленія. При усадкѣ новаго слоя, по плоскости соприкосновенія въ немъ появились растягивающія усилія, а въ нижнемъ соответствующія сжимающія усилія.

При повтореніи такого же опыта, но съ образцами не изъ чистаго цемента, а изъ раствора 1:3 (600 килогр. цемента на 1 куб. метръ песка) трещины не наблюдались.



Фиг. № 13.

<sup>1)</sup> Armirter Beton, 1909 г.; стр. 352.



Разсмотримъ дальше, какія услія возникаютъ внутри щебеночнаго бетона при деформации раствора и камневидныхъ.

Какъ видно изъ таблицы № 7, относительная усушка на воздухѣ въ двухнедѣльный срокъ можетъ быть принята:

для кирпичнаго щебня . . . . .	0,00011
„ известковаго „ . . . . .	0,00013
„ гранитнаго „ . . . . .	0,00015

Усушка же для растворовъ въ тотъ же двухнедѣльный срокъ по таблицѣ № 9:

1) изъ чистаго цемента—0,00095, т. е. въ 6,3 раза больше, чѣмъ для гранитнаго щебня;

2) изъ 1 части цемента и 3-хъ частей песка—0,00038, т. е. въ 2,5 раза больше, чѣмъ для гранитнаго щебня.

Отсюда слѣдуетъ, что въ утрамбованной массѣ бетона камневидныя (щебень и гравій), упирався одна въ другую, будутъ мѣшать полной усушкѣ находящагося между ними раствора при твердѣніи на воздухѣ, такъ какъ онѣ подвержены меньшей усушкѣ. Въ данномъ случаѣ щебенки будутъ производить то же, что желѣзный стержень въ опытѣ Консидера. Приведенныя соображенія подтверждаются опытами: усушка щебеночнаго бетона меньше, чѣмъ бетона безъ щебня.

Итакъ въ бетонѣ, въ составъ котораго входятъ щебенки, при твердѣніи на воздухѣ, появляются внутреннія напряженія, вслѣдствіе разности между усадкой камневидныхъ и окружающаго ихъ раствора. Совершенно иная картина получается при твердѣніи щебеночнаго бетона въ водѣ. Камневидныя въ массѣ бетона, при твердѣніи его въ водѣ, не могутъ играть той роли, какую играетъ желѣзный стержень въ опытѣ Консидера, такъ какъ эти камневидныя не имѣютъ непосредственной связи между собой; связь эта опредѣляется исключительно вязущей силой окружающаго щебенки раствора. Растворъ расширяется больше, чѣмъ щебенки и послѣднія поэтому не могутъ препятствовать этому расширенію. Такимъ образомъ, при твердѣніи бетона въ водѣ, въ массѣ его нѣтъ причинъ для образования внутреннихъ напряженій.

Но всякое внѣшнее препятствіе увеличенію объема бетона, при твердѣніи въ водѣ, повышаетъ его прочность, такъ какъ способствуетъ уплотненію его, особенно въ періодъ схватыванія.

Всякое измѣненіе объема камневидныхъ въ отвердѣвшемъ бетонѣ должно вызывать внутреннія напряженія, противодействующія относительному перемѣщенію частицъ. Эти дополнительные напряженія будутъ суммироваться съ тѣми, которыя появятся въ бетонѣ вслѣдствіе разности относительной усушки щебня и раствора.

Резюмируя все вышеизложенное можно сдѣлать слѣдующіе выводы: <sup>1)</sup>

1) Наибольшія внутреннія напряженія появляются въ бетонѣ при твердѣніи на воздухѣ.

2) Наибольшія измѣненія объема растворовъ наблюдаются въ начальные сроки твердѣнія.

3) При твердѣніи на воздухѣ наиболѣе опасныя напряженія появляются въ бетонахъ жирныхъ. Уменьшенія этихъ напряженій можно достигнуть употребленіемъ наименьшаго количества цемента, примѣняя камневидныя и пески, подобранные между собою такъ, чтобы получился наименьшій объемъ пустотъ.

4) При твердѣніи на воздухѣ внутреннія напряженія въ бетонѣ возрастаютъ съ увеличеніемъ разности между усадкой камневидныхъ и раствора.

5) Съ увеличеніемъ этой разности уменьшаются плотность, упругость и крѣпость бетона.

6) Всякое внѣшнее стѣсненіе усадки также понижаетъ качество бетона, уменьшая его плотность, упругость и крѣпость.

1) Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912. стр. 320.

7) При твердннн на воздухъ наименьшія внутреннія напряжения получаютъ при сохраненіи постоянной влажности бетона въ теченіе возможно болѣе продолжительнаго времени.

8) Вліяніе влажности на вполне отвердѣвшіе растворы и бетоны сильно отличается отъ того вліянія, которое обуславливается процессомъ твердннн въ первоначальные сроки; можно принять, что вліяніе влажности на отвердѣвшіе растворы и бетоны не зависитъ отъ количества цемента въ бетонѣ или растворѣ.

9) Въ бетонахъ, тверднющихъ въ водѣ, всякое препятствіе увеличенію объема, увеличиваетъ ихъ плотность и крѣпость.

Условія, въ которыхъ находятся бетонныя сооруженія до снятія формъ, представляютъ нѣчто среднее между условіями твердннн образцовъ въ водѣ и на воздухъ. Чѣмъ дольше будутъ сохранены въ бетонѣ первоначальныя условія влажности, тѣмъ благоприятнѣе будетъ твердннн бетона на воздухъ послѣ снятія формъ и прекращенія поливки.

## ГЛАВА V. Вліяніе внѣшней температуры на растворы и бетоны.

### § 19. Вліяніе внѣшней температуры на растворы и бетоны.

Въ предыдущихъ главахъ мы разсмотрѣли вліяніе качества и количества воды и влажности на тверднющие цементные растворы и бетоны. Разсмотримъ теперь вліяніе внѣшней температуры. На разнородныя составныя части бетона внѣшняя температура вліяетъ, стремясь измѣнить объемъ каждаго матеріала соотвѣтственно его природнымъ свойствамъ. Поэтому вліяніе температуры, выражается двоякимъ образомъ:

1) явное вліяніе температуры, сказывающееся въ видимомъ измѣненіи объема бетоннаго образца;

2) скрытое вліяніе температуры, проявляющееся въ возникновеніи въ массѣ бетона внутреннихъ напряженій, которыя обуславливаются неодинаковымъ измѣненіемъ объема составныхъ частей бетона. II являющіяся такимъ образомъ внутреннія напряжения, подобно напряжениямъ отъ вліянія влажности, измѣняютъ механическія качества бетона.

Разсмотримъ вліяніе внѣшней температуры на каждую изъ составныхъ частей бетона отдѣльно.

Въ таблицѣ № 12 приведены среднія величины коэффициентовъ линейнаго расширенія составныхъ частей бетона, цементнаго раствора и различныхъ камневидныхъ телъ нагрѣваніи на  $100^{\circ} C$  <sup>1)</sup>

Изъ этой таблицы видно, что цементъ обладаетъ наибольшимъ изъ всѣхъ перечисленныхъ матеріаловъ коэффициентомъ расширенія, а кирпичъ — наименьшимъ.

Въ l'École des Ponts et Chaussées <sup>2)</sup> изъ цѣлой серіи опытовъ были опредѣлены коэффициенты расширенія для различныхъ растворовъ безъ примѣси песка. Для портландцемента получились коэффициенты, приведенные въ таблицѣ № 13.

Keller, <sup>3)</sup> призвавшій опыты надъ образцами изъ чистаго цемента и изъ бетона разнаго состава, показалъ, что коэффициентъ расширенія уменьшается по мѣрѣ отнесенія состава образцовъ. Результаты опытовъ Keller'a приведены въ таблицѣ № 14.

Изъ этой таблицы видно, что коэффициентъ расширенія раствора изъ чистаго цемента больше коэффициента расширенія примѣняемыхъ на практикѣ бетоновъ.

Разсмотримъ коэффициентъ расширенія щебеночныхъ бетоновъ. Въ бетонахъ этого рода щебень или гравій составляютъ главную массу — остовъ бетона, поэтому они

<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г. стр. 367, 368.

<sup>2)</sup> Concrete and Constructional Engineering, 1911 г., Vol VI, стр. 347.

<sup>3)</sup> Armierter Beton, 1911 г. стр. 194.

должны играть главную роль при видимом расширеніи бетонныхъ образцовъ, что особенно должно быть при тощихъ бетонахъ.

Т А Б Л И Ц А № 12.

№№	Материалы.	Кoeffициентъ линейнаго расширенія на 100° С.	Относительная величина
1	Растворы изъ чистаго цемента . . . . .	0,00132	1,00
2	Растворъ 1:2 . . . . .	0,00118	0,89
3	Гранитъ . . . . .	0,00081	0,61
4	Известняки . . . . .	0,00091	0,69
5	Мраморъ . . . . .	0,00076	0,58
6	Песчаники . . . . .	0,00124	0,94
7	Сланцы . . . . .	0,00101	0,76
8	Кирпичъ . . . . .	0,00045	0,34
9	Кварцъ: { а) перпендикулярно оси кристалловъ . . . . . { б) параллельно оси кристалловъ . . . . .	0,00133 0,00079	1,00 0,60

Т А Б Л И Ц А № 13.

Вязущія вещества.	Кoeffициентъ расширенія 100 "		
	Наименьшій	Наибольшій	Средній
Портландъ-цементъ. . . . .	0,00093	0,00111	0,00099

Т А Б Л И Ц А № 14.

№№ составовъ.	Составъ образцовъ, по вѣсу.		Кoeffициентъ расширенія на 100° С.	Относительная величина.
	Цементъ.	Песокъ, гравій.		
I	1	0	0,00126	1,00
II	1	1	0,00110	0,87
III	1	2	0,00101	0,80
IV	1	4	0,00104	0,82
V	1	6	0,00092	0,73
VI	1	8	0,00095	0,75

Для подтвержденія этихъ теоретическихъ заключеній могутъ отчасти служить опыты Ренсе<sup>а, 1)</sup> опредѣлявшаго коэффициентъ расширения цилиндрическихъ бетонныхъ образцовъ. Бетонные образцы были взяты длиною 0,915 метр., діаметромъ 10,2 сантим. Составъ бетона 1 : 2 : 4. Образцы были взяты двухъ сортовъ: одни состояли изъ известкового щебня съ величиною щебенюкъ отъ 0,6 сантим. до 3 сантим., другіе — изъ известкового гравія тѣхъ же размѣровъ. Цементъ для опытовъ былъ взятъ изъ двухъ заводовъ. Условія приготовленія, храненія и испытанія были одинаковы для обоихъ сортовъ. Параллельно опредѣлялся коэффициентъ расширения образцовъ изъ того же известняка, который былъ взятъ для гравія и щебня. Въ таблицѣ № 15 приведены результаты опытовъ.

ТАБЛИЦА № 15.

Г р у п п а 1 - я				Г р у п п а 2 - я		
Составъ: 1 часть цемента, 2 части песка, 4 части известкового щебня				Составъ: 1 ч. цем., 2 ч. песка, 4 ч. известкового гравія		
№ образц.	Ломки известняка	Марка цемента	Коэффициентъ расширения на 100° Цельсія	№ образц.	Марка цемента	Коэффициентъ расширения на 100° Цельсія
1	Bedford	A	0,00094	8	A	0,00097
2	"	"	0,00095	9	B	0,00099
3	"	"	0,00095	10	B	0,00095
4	"	"	0,00103	11	B	0,00094
Среднее . . . . .			0,00098	Среднее . . . . . 0,00096		
5	Копкакее	B	0,00101			
6	"	"	0,00097			
7	"	"	0,00108			
Среднее . . . . .			0,00100			

Коэффициентъ расширения образцовъ изъ известняка —  $100\alpha = 0,00100$ , т. е. оказался равнымъ средней величинѣ коэффициента расширения бетонныхъ образцовъ № № 5, 6, 7, приготовленныхъ изъ щебня того же известняка.

По даннымъ проф. Rudelloffa<sup>2)</sup> коэффициентъ расширения бетонныхъ образцовъ составъ: 1 часть портландъ-цемента, 3,8 ч. песка и 7,03 ч. гравія съ величиной зеренъ отъ 0,5 до 3,2 сантим. измѣняется въ предѣлахъ 0,0000949 до 0,0000130 въ зависимости отъ возраста (отъ 28 до 372 дней), способа храненія и температуры нагреванія.

Нагреваніе образца вызываетъ въ немъ слѣдующіе эффекты: съ одной стороны, съ увеличеніемъ температуры образца, увеличивается его объемъ, съ другой стороны, съ

<sup>1)</sup> Journal of the Western Society of Engineers, 1901 г., стр. 549. Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Екатеринбургъ 1912, стр. 369, 370.  
<sup>2)</sup> Annuaire Beton, 1911 г., стр. 172.

повышеніемъ температуры, какъ было указано выше, уменьшается влажность образца, а это влечетъ его усушку, т. е. уменьшеніе объема.

Поэтому измѣряемое удлиненіе представляетъ алгебраическую сумму этихъ измѣненій длины образца, зависящихъ отъ совокупности многихъ условій, описанныхъ выше. Съ практической точки зрѣнія наблюдаемая измѣненія длины имѣютъ большое значеніе, такъ какъ соответствуютъ условіямъ дѣйствительности; съ научной точки зрѣнія величина коэффициента расширенія, опредѣленного такимъ образомъ невѣрна, такъ какъ требуетъ поправки, выражающей вліяніе усушки образца.

При продолжительномъ нагрѣваніи образцовъ на 35° Цельсія, усушка, какъ показываютъ опыты, можетъ превышать расширеніе образцовъ. Эти образцы возстанавливаютъ первоначальную длину подъ вліяніемъ влажности воздуха, но для этого нужно продолжительное время.

Профессоръ Norton,<sup>1)</sup> производя опыты надъ образцами изъ бетона состава: 1 ч. портландъ-цемента, 2 ч. песка и 5 ч. щебня, опредѣлялъ коэффициентъ расширенія 0,000099 при нагрѣваніи отъ 0° до 100°; поднимая температуру выше до 300° Ц., онъ наблюдалъ незначительное увеличеніе коэффициента расширенія; при дальнѣйшемъ увеличеніи температуры онъ наблюдалъ уже уменьшеніе коэффициента расширенія, которое дошло до 0 при температурѣ + 815° Ц.; при дальнѣйшемъ накачиваніи онъ наблюдалъ укороченіе образца. Послѣ охлажденія въ такомъ прокаленномъ образцѣ получилось остающееся удлиненіе, которое составляло 70% отъ общаго удлиненія образца. Явленіе это можетъ быть объяснено измѣненіемъ свойствъ цементнаго раствора вслѣдствіе испаренія кристаллизационной и химически связанной воды при сильномъ нагрѣваніи. Изъ приведенныхъ опытовъ видно, какія затрудненія возникаютъ при опредѣленіи истинной величины коэффициента расширенія бетоновъ, такъ какъ невозможно разграничить вліяніе измѣненія влажности при нагрѣваніи образца.

## § 20. Сравненіе вліяній влажности и внѣшней температуры на растворы и бетоны.

Для сравненія вліянія влажности и внѣшней температуры на измѣненіе объема каменныхъ матеріаловъ и цементнаго раствора составлена<sup>2)</sup> таблица № 16, въ которой приведены среднія линейныя измѣненія матеріаловъ при измѣненіи температуры до 50° Цельсія и данныя таблицъ № 7 и № 9, представляющія возможную относительную усушку тѣхъ же матеріаловъ при тверднѣніи бетоновъ на воздухѣ въ теченіе 2-хъ недѣль.

ТАБЛИЦА № 16.

№	МАТЕРІАЛЫ	Относительныя измѣненія длины при измѣненіи температуры на:			Относительная усушка	t <sub>1</sub> - t <sub>0</sub> = t
		1	2	3		
		10°	25°	50°		
1	Растворъ изъ чист. цемента	0,00013	0,00033	0,00066	0,0 095	73
2	Кирпичъ . . . . .	0,00004	0,00011	0,00022	0,00011	28
3	Песчаники . . . . .	0,00012	0,00031	0,00062	0,00065	54
4	Известняки . . . . .	0,00009	0,00022	0,00045	0,00013	14
5	Гранитъ . . . . .	0,00008	0,00020	0,00040	0,00015	19

<sup>1)</sup> Concrete and Constructional Engineering, 1911 г., Vol. VI, стр. 348. Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 370.

<sup>2)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 371.

Въ столбцахъ 1, 2 и 3 таблицы № 16 приведены относительныя линейныя измѣненія составныхъ частей бетона при измѣненіи температуры на 10°, 25° и 50°, а въ столбцѣ 4-мъ относительная усушка въ 2-хъ недѣльный срокъ.

Въ столбцѣ 5-мъ таблицы приведены тѣ разности температуръ, которыя вызываютъ въ приведенныхъ материалахъ такія же измѣненія объемовъ, какія получаются при усушкѣ въ двухнедѣльный срокъ въ тѣхъ же материалахъ. Отсюда слѣдуетъ, что при переходѣ за указанные предѣлы, измѣненія температуры получаютъ уже преобладающее вліяніе на измѣненіе объема элементовъ бетона.

Опредѣлимъ для примѣра по таблицѣ наибольшія сжатія при пониженіи температуры на 25° (2-й столбецъ) и при усушкѣ въ 2-хъ недѣльный срокъ (столбецъ 4-й).

		Относ. величина.
1) для цементнаго раствора . . . . .	0,00033 + 0,00095 = 0,00128	5,82
2) „ песчаниковъ . . . . .	0,00031 + 0,00065 = 0,00096	4,36
3) „ известняковъ . . . . .	0,00022 + 0,00013 = 0,00035	1,59
4) „ гранита . . . . .	0,00020 + 0,00015 = 0,00035	1,59
5) „ кирпича . . . . .	0,00011 + 0,00011 = 0,00022	1

Сравненіе вліяній влажности и вѣшной температуры приводитъ къ слѣдующимъ выводамъ: 1)

Наибольшая усушка растворовъ наблюдается въ періодъ схватыванія и въ начальныя сроки тверднѣнія, зависитъ, повидимому, отъ химическихъ явленій, сопровождающихъ тверднѣніе цемента на воздухѣ.

Усушка каменныхъ материаловъ, какъ вполне инертныхъ составныхъ частей бетона, зависитъ исключительно отъ быстроты испаренія находящейся въ нихъ свободной воды. Вслѣдствіе такой двойственности причинъ, вызывающихъ измѣненіе объема составныхъ частей бетона, явленіе усушки бетона, твердѣющаго на воздухѣ, отличается большею сложностью, чѣмъ измѣненіе объема бетона только подъ вліяніемъ измѣненной вѣшной температуры.

На практикѣ стремятся сохранить, по мѣрѣ возможности, постоянство влажности и температуры окружающей среды до тѣхъ поръ, пока бетонъ не достигнетъ той крѣпости, которая можетъ противостоять дальнѣйшимъ измѣненіямъ условій влажности и температуры.

Внутреннія массы отвердѣвшихъ бетоновъ, постепенно теряя часть заключающейся въ нихъ свободной воды на испареніе, стремятся къ достиженію нѣкоторой постоянной влажности.

Вѣшняя температура измѣняется въ весьма широкихъ предѣлахъ и соответственно этому вызываетъ измѣненія объема подверженныхъ непосредственному дѣйствию атмосферы каменныхъ сооружений.

Неизмѣняемость условій влажности и температуры внутри бетонныхъ массивовъ опредѣляется двумя физическими свойствами—непроницаемостью и теплопроводностью бетона. Непроницаемость бетона находится въ прямой зависимости отъ его плотности. Теплопроводность бетона зависитъ отъ пористости какъ самого бетона, такъ и его составныхъ частей.

Въ отвердѣвшей массѣ бетона, вслѣдствіе непрерывнаго колебанія температуры, происходитъ какъ бы постоянная борьба между двумя элементами бетона: вяжущимъ веществомъ и инертными составными частями. Коэффициенты упругости камневидныхъ и отвердѣвшаго бетона достигаютъ своего опредѣленнаго значенія; вслѣдствіе этого самое малое измѣненіе объема составныхъ частей вызываетъ стремленіе къ относительному переизбытку составныхъ частицъ; а это обстоятельство влечетъ за собой проявленіе внутреннихъ напряженій.

Возможность относительнаго перемѣщенія частицъ въ массѣ бетона безъ разрыва этой массы опредѣляется механическими свойствами цементнаго раствора и каменныхъ элементовъ частей бетона.

## ГЛАВА VI. Термическія свойства бетоновъ.

Закончивъ разсмотрѣніе вопроса о вліяніи на схватываніе и твердніе цементныхъ растворовъ и бетоновъ качества и количества воды, а также температуры воды и окружающей среды, перейдемъ къ разсмотрѣнію термическихъ свойствъ бетоновъ: теплопроводности и теплоемкости.<sup>1)</sup>

### § 21. Теплопроводность.

Теплопроводность бетоновъ еще мало изучена. Въ бетонахъ разнаго состава цементный растворъ составляетъ 25%—50% всего объема; остальная масса состоитъ изъ щебня или гравія.

Теплопроводность бетона зависитъ отъ слѣдующихъ данныхъ:

- 1) Теплопроводности матеріала камневидныхъ;
- 2) состава бетона и
- 3) плотности бетона.

Наименьшей теплопроводностью обладаютъ пористые бетоны изъ пористыхъ, мало-теплопроводныхъ матеріаловъ, наибольшую — плотные бетоны изъ плотныхъ матеріаловъ, какъ то: кварцевый песокъ, щебень или гравій изъ кварцитовъ, кремней и т. д.

Для бетонныхъ стѣнъ жилыхъ зданій наиболѣе пригоднымъ матеріаломъ оказался тощій пористый бетонъ изъ щебня кирпичнаго, шлаковаго или изгарини.

Коэффициентъ внутренней теплопроводности выражаетъ количество въ калоріяхъ (большихъ) тепла, проходящаго въ 1 часъ черезъ 1 кв. метръ поверхности стѣны толщиной 1 метръ, при разности температуръ двухъ наружныхъ поверхностей равной 1° Цельсія.

Въ таблицѣ № 17<sup>1)</sup> приведены коэффициенты внутренней теплопроводности для бетоновъ и матеріаловъ для бетона.

Изъ этой таблицы слѣдуетъ:

- 1) Теплопроводность бетона трамбованнаго превышаетъ въ 2 раза теплопроводность такого же состава, но нетрамбованнаго бетона.
- 2) Теплопроводность шлаковыхъ бетоновъ въ 2, 5—4 раза меньше теплопроводности обыкновеннаго трамбованнаго бетона на щебнѣ изъ естественныхъ камней.
- 3) Наименьшею теплопроводностью обладаетъ шлаковый бетонъ, несодержащій песка.
- 4) Трамбованные бетоны на щебнѣ изъ естественныхъ камней имѣютъ меньшую теплопроводность, чѣмъ кладка изъ тѣхъ же камней.

### § 22. Теплоемкость.

Теплоемкость или удѣльная теплота выражаетъ количество единицъ теплоты, необходимое для нагрѣванія на 1° Цельсія 1 килограмма вещества; она зависитъ отъ природы вещества и температуры.

Въ таблицѣ<sup>1)</sup> № 18 приведена средняя теплоемкость для бетоновъ и нѣкоторыхъ матеріаловъ между 0° и 100° Цельсія.

<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 364 и слѣдующія.

ТАБЛИЦА № 17

№№	Наибольшая температура на поверхности Градусы Цельсия	Материалы	Теплопроводность
1	35	Бетонъ состава: 1 ч. портландъ-цемента, 2 ч. песка, 5 частей щебня, трамбованный . . . . .	0,78
2	50	Бетонъ, состава: 1 ч. портландъ-цемента, 2 ч. песка и 4 части щебня, нетрамбованный . . . . .	0,40—0,58
3	50	Бетонъ состава: 1 ч. портландъ-цемента, 2 ч. песка и 4 ч. шлаковъ, трамбованный . . . . .	0,29
4	200—1100	Бетонъ изъ 1 ч. портландъ-цемента, 2 ч. песка и 4 части щебня, трамбованный . . . . .	0,76—1,04
5	90	Бетонъ шлаковый изъ 1 ч. портландъ-цемента и 9 ч. доменныхъ шлаковъ (0,61:1 по вѣсу), вѣсомъ 550 кил. куб. м. . . . .	0,19
6	90	Растворъ изъ чистаго цемента вѣсомъ 2000 кил. куб. м. . . . .	0,78
7	—	Цементные растворы съ различнымъ колич. песка . . . . .	0,49—0,67
8	35	Обожженная глина . . . . .	0,51—0,69
9	35	Мраморъ сѣрый мелко-зернистый . . . . .	3,68
10	—	Мраморъ бѣлый крупно-зернистый . . . . .	2,78
11	—	Известнякъ мелко-зернистый . . . . .	1,7—2,08
12	—	„ крупно-зернистый . . . . .	1,30
13	—	Песчаники . . . . .	1,30
14	—	Кварцевый песокъ . . . . .	0,27
15	—	Кирпичная кладка . . . . .	0,70
16	—	Бутовая кладка (гранитная) . . . . .	1,3—2,1
17	—	Ледъ . . . . .	2,06 <sup>1)</sup>
18	—	Вода (при 18° С) . . . . .	0,47 <sup>1)</sup>
19	—	Дерево еловѣ поперекъ волоконъ . . . . .	0,093

ТАБЛИЦА № 18.

№№	Материалы	Теплоемкость больш. калорій
1	Вода . . . . .	1 <sup>2)</sup>
2	Ледъ . . . . .	0,92 <sup>3)</sup>
3	Бетонъ изъ: 1 ч. портл.-цемента, 2 ч. песка, 5 ч. щебня изъ естественныхъ камней . . . . .	0,156
4	Бетонъ изъ тѣхъ же материаловъ состава 1:2:4 . . . . .	0,154
5	Бетонъ изъ: 1 ч. портл.-цемента, 2 ч. песка и 4 ч. шлаковъ между 220—189° Цельсия . . . . .	0,180
6	Гранитъ . . . . .	0,189—0,203
7	Мраморъ . . . . .	0,21
8	Песчаники . . . . .	0,22
9	Песокъ (SiO <sub>2</sub> ) . . . . .	0,1914 <sup>2)</sup>
10	Кирпичъ . . . . .	0,189—0,241
11	Мѣлъ . . . . .	0,21-9 <sup>3)</sup>
12	Коксъ . . . . .	0,203
13	Стекло . . . . .	0,1977 <sup>3)</sup>
14	Шлаки доменные . . . . .	0,180—0,195
15	Дубъ . . . . .	0,57 <sup>2)</sup>
16	Сосна . . . . .	0,65 <sup>2)</sup>
17	Уголь древесный . . . . .	0,2415 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики, томъ III стр. 291, 300. Для перевода изъ системы. С. G. S. умножены на 360.

<sup>2)</sup> Федотьевъ. Физико-Химическія таблицы. Петербургъ. 1901. Стр. 185.

<sup>3)</sup> Павловъ ия. Курсъ отопления и вентиляціи. Петербургъ 1906. Стр. 289.



## ГЛАВА VII.

### § 23. Вліяніє на постоянство объема явленій, происходящихъ внутри бетона въ періодъ твердїня

Химическія реакціи, происходящія при схватываніи и твердїни цемента—реакціи экзотермическія, т. е. сопровождающіяся выдѣленіемъ теплоты. Поэтому въ твердѣющихъ бетонныхъ массивахъ имѣется самостоятельный источникъ теплоты.

Наличіе этого внутренняго источника теплоты является благопріятнымъ при производствѣ бетонной кладки во время морозовъ, а также при разныхъ колебаніяхъ температуры, такъ какъ это наличіе внутренней теплоты является регуляторомъ для поддержанія постоянной температуры въ бетонномъ массивѣ. Лабораторные опыты показали, <sup>1)</sup> что при затвореніи 1 кил. цемента происходятъ слѣдующія явленія:

- 1) подъемъ температуры раствора возрастаетъ по мѣрѣ увеличенія скорости схватыванія цемента;
- 2) подъемъ температуры тѣста наблюдается раньше, чѣмъ игла Вика обнаруживаетъ начало схватыванія;
- 3) наибольшій подъемъ температуры, наблюдавшійся при затвореніи 1 килогр. портландскаго цемента достигал 9° Цельсія; при этомъ для разныхъ сортовъ цемента наименьшій срокъ съ момента затворенія до наибольшаго подъема температуры оказался 43 минуты, а наибольшій — 2 часа 57 минутъ.

Условія, при которыхъ производятся опыты въ лабораторіи, сильно разнятся отъ условій практики: въ лабораторіяхъ опыты производятся надъ малымъ количествомъ цемента, тогда какъ въ практикѣ строительства приходится имѣть дѣло съ большими массами бетона, а при этомъ условиі уменьшается вліяніе внѣшнихъ условій, какъ, на примѣръ, вліяніе охлажденія черезъ наружныя поверхности. Что приведенныя соображенія соотвѣтствуютъ дѣйствительности, это видно изъ опытовъ Гейнца. <sup>2)</sup> Эти опыты показали, что, при затвореніи 9 килограммовъ медленно-схватывающагося цемента, температура раствора черезъ 7 часовъ поднялась на 16° Цельсія, а при затвореніи 32 килогр. — на 30,5°. Французскій инженеръ Рибокуръ приводитъ случаи повышенія температуры въ бетонной кладкѣ до 46° Цельсія.

При сооружеіи новой Кетскильской плотины для водоснабженія города Нью-Йорка были произведены наблюденія надъ измѣненіями температуры въ бетонной кладкѣ. Плотина имѣетъ ширину, считая по гребню, 8,50 метровъ, при наибольшей высотѣ 94 метр. Составъ бетона 1 : 3 : 6 съ включенными въ кладку большими булыжниками, общій объемъ которыхъ составляетъ отъ 25% до 30% всего объема плотины. Подъ вліяніемъ схватыванія цементнаго раствора наблюдалось наибольшее возвышеніе температуры до 48° С.

Возвышеніе температуры наблюдалось въ теченіе 30 дней. <sup>3)</sup>

При постройкѣ Панамскаго канала въ кладкѣ бетонныхъ шпозовъ наблюдалось возвышеніе температуры, доходившее до 57° С. Составъ бетона былъ болѣе жирный, чѣмъ бетонъ Кетскильской плотины. <sup>3)</sup>

Измѣренія температуры, произведенныя проф. Житкевичемъ <sup>1)</sup> внутри бетонной стѣны толщиной 5 футовъ, при составѣ бетона 1 : 3 : 7, показали, что наибольшая температура посрединѣ стѣны достигла къ концу 4-го дня + 21,3° Цельсія при наружной температурѣ + 12° Ц; это даетъ разницу температуръ 21,3—12 = 9,3°. Термометры, расположен-

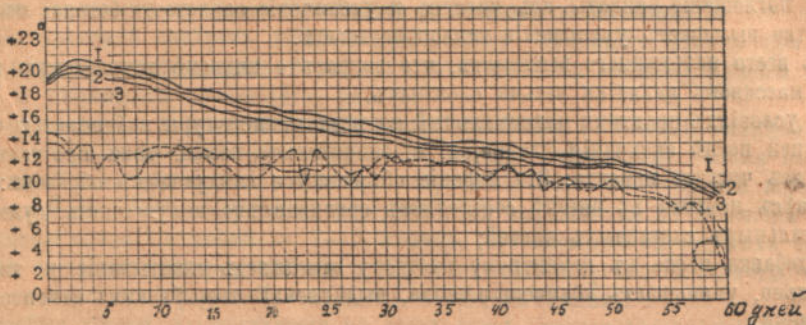
<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 373, 374.

<sup>2)</sup> И Малюга. Свойство портландскаго цемента. Инженерный журналъ 1891 г. № 9, стр. 1222.

<sup>3)</sup> Журналъ Мин. Путей Сообщенія. 1916 г. Книга IX. Наблюденія надъ измѣненіями температуры въ бетонной кладкѣ Кетскильской плотины.

ные на расстоянiи  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{1}{8}$  толщины стѣны, показали  $+20,6^{\circ}$  Ц. Указанныя максимальныя температуры держались всѣми термометрами въ теченiе 2-хъ сутокъ; послѣ чего началось постепенное пониженiе температуры внутри стѣнъ.

Среднiя показанiя каждой группы термометровъ, наблюдавшiяся въ теченiе 2-хъ мѣсяцевъ, выражены на фиг. № 14 сплошными линiями; показанiя термометровъ внутри и снаружи каземата показаны пунктирными линiями.



Фиг. 14.

При постройкѣ вблизи г. Boonton'a бетонной плотины, длиною 900 футовъ, средней шириною въ основанiи 55 фут., изъ бетона состава 1:3:6, были произведены наблюденiя надъ измѣненiемъ температуры внутри бетонной массы.

Получены слѣдующiе результаты <sup>1)</sup>:

1) Подъемъ температуры внутри бетоннаго массива обнаружился, тотчасъ же послѣ закладки бетона; максимальная температура достигла  $+38^{\circ}$  Цельсия черезъ 18 часовъ послѣ закладки бетона.

2) Выдѣленiе теплоты, сопровождающее химическую реакцiю тверднiя цемента, оказалось мало замѣтнымъ лишь по прошествiи года послѣ окончанiя бетонной закладки.

3) Послѣ этого годичнаго срока наибольшiя и наименьшiя измѣненiя температуры вѣнней атмосферы обнаруживались въ средней части ядра массива черезъ 30 дней послѣ закладенiя соответственныхъ наибольшихъ и наименьшихъ измѣненiй температуры воздуха.

Какъ указывалось выше, выдѣленiе теплоты является слѣдствiемъ экзотермической реакцiи, обуславливающей собою тверднiе цемента въ присутствiи воды.

Слѣдовательно теплота должна выдѣляться непрерывно въ теченiе всего периода тверднiя бетона.

Чѣмъ энергичнѣе идетъ реакцiя при соединенiи цемента съ водой, тѣмъ большее количество теплоты должно выдѣляться въ единицу времени. Выдѣляющаяся теплота обуславливаетъ собою повышенiе температуры бетонной массы. Когда эта температура превышаетъ температуру окружающей среды, то, естественно, должно начаться охлажденiе на поверхности бетоннаго массива вслѣдствiе разности температуръ; а это обстоятельство вызываетъ отливъ теплоты изъ ядра массива къ наружнымъ охлаждаемымъ предметамъ.

По мѣрѣ хода процесса схватыванiя и тверднiя цемента, свободная вода въ массѣ бетона постепенно переходитъ въ гидратную (химически связанную), благодаря чему въ массѣ бетона появляются поры, заполненныя воздухомъ; а это обстоятельство уменьшаетъ теплопроводность бетона.

Съ уменьшенiемъ теплопроводности температура внутри бетоннаго массива должна была бы подняться, но нѣкоторое количество теплоты уходитъ на подъемъ температуры

<sup>1)</sup> Engineering News, 1908 г., Vol. 60, стр. 284.

Житковичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 374.

имѣющейся въ наличности свободной воды. Вслѣдствіе большой теплоемкости воды количество это значительно. Благодаря этому обстоятельству устраняется возможность быстрого подъема температуры внутри бетоннаго массива. Наоборотъ, при пониженіи температуры окружающей среды, присутствіе извѣстнаго количества свободной воды въ массѣ бетона регулируетъ пониженіе температуры при охлажденіи массива.

Помимо описанныхъ процессовъ, съ наружныхъ поверхностей, а затѣмъ и изъ ядра бетоннаго массива неизбежно испареніе свободной воды; слѣдствіемъ этого обстоятельства является: поглощеніе теплоты изъ массива и увеличеніе пористости бетона; послѣднее обстоятельство вызываетъ уменьшеніе теплопроводности.

Изъ всего изложеннаго вытекаетъ, что вопросъ о подъемѣ температуры внутри бетонныхъ массивовъ является весьма сложнымъ.

Въ условіяхъ практики максимальный подъемъ температуры наблюдается черезъ нѣсколько дней послѣ окончанія кладки, т. е. значительно позже, чѣмъ при затвореніи растворовъ изъ чистаго цемента. Это явленіе объясняется слѣдующимъ образомъ:<sup>1)</sup>

1) вѣсъ цемента въ бетонѣ составляетъ сравнительно малую часть суммы вѣсовъ вѣсхъ остальныхъ составныхъ частей;

2) добавка песка къ цементному раствору замедляетъ схватываніе и твердѣніе и, слѣдовательно, уменьшаетъ количество тепла, выдѣляемаго твердѣющимъ цементомъ въ единицу времени.

## ГЛАВА VIII. Вліяніе морозовъ на растворы и бетоны и существующіе способы производства бетонной кладки въ морозы.

### § 24. Установившійся взглядъ въ наукѣ и административной практикѣ на бетонныя работы на морозѣ.

Относительно вліяній морозовъ на цементные растворы и бетоны въ практикѣ бетоннаго дѣла и литературѣ по этому вопросу установились слѣдующія тенденціи:<sup>1)</sup>

1) Пониженіе температуры замедляетъ процессъ схватыванія. По опытамъ проф. Тетмайера растворъ (1 : 3) при температурѣ  $+18^{\circ}\text{C}$ . началъ схватываться черезъ 2,6 часа послѣ затворенія; конецъ схватыванія наступилъ черезъ 8,5 часовъ; при температурѣ же замерзанія сроки начала и конца схватыванія получились соотвѣтственно черезъ 21 и 38 часовъ. При морозѣ ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . схватываніе совершенно останавливается,<sup>2)</sup> но возобновляется снова, когда температура поднимется выше точки замерзанія.

2) Закрывающаяся въ растворѣ или бетонѣ свободная вода замерзаетъ при морозѣ и въ такомъ состояніи не вступаетъ въ химическое взаимодействіе съ цементомъ.

3) Замерзающая вода, увеличиваясь въ объемѣ, можетъ вызвать нарушеніе связи между частицами бетона.

4) Растворы и бетоны изъ большинства романъ-цементовъ разрушаются при замерзаніи.

5) Неокрѣпшая каменная кладка, сдѣланная на растворѣ изъ романъ-цементовъ, увеличивается въ объемѣ при замерзаніи и даетъ осадки при оттаиваніи.

6) Окончательная крѣпость растворовъ и бетоновъ изъ портландъ-цемента черезъ продолжительные сроки не уменьшается при слѣдующихъ условіяхъ:

а) если образцы подвергаются дѣйствию мороза послѣ окончательнаго схватыванія цемента;

б) или если образцы замерзаютъ до наступленія начала схватыванія и затѣмъ послѣ оттаиванія наступаютъ условія для нормальнаго схватыванія цемента, но безъ повторнаго замерзанія, прерывающаго начавшійся процессъ схватыванія.

<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ 1912 г., стр. 375, 291.

<sup>2)</sup> Эвальдъ. Строительные матеріалы. 1912 г., стр. 211.

При тѣхъ же условіяхъ для малыхъ сроковъ получается пониженіе крѣпости образцовъ въ сравненіи съ образцами, твердыми при нормальныхъ условіяхъ.

7) На поверхности бетонныхъ массивовъ, замерзшихъ ранѣе отвердѣнія, замѣчается отдупливаніе тонкихъ слоевъ бетона.

8) Предварительное подогрѣваніе матеріаловъ ускоряетъ схватываніе бетона и замедляетъ дѣйствіе мороза.

9) Поваренная соль понижаетъ точку замерзанія воды; добавка соли до 10% отъ вѣса воды не понижаетъ предѣльной крѣпости растворовъ и бетоновъ.

10) На практикѣ слѣдуетъ избѣгать производства бетонныхъ работъ при морозѣ, такъ какъ принятіе необходимыхъ мѣръ для противодѣйствія вредному вліянію морозовъ усложняетъ и удорожаетъ производство работъ.

Данныя практики и многочисленные опыты позволяютъ вывести заключеніе, что вліяніе морозовъ вызываетъ въ незатвердѣвшемъ бетонѣ поврежденія только на поверхности сооружений, но при условіи, что при сооруженіи были приняты всѣ необходимыя мѣры. Эти поврежденія на наружныхъ поверхностяхъ выражаются въ отслоеніи верхней марки толщиной около  $\frac{1}{6}$  дюйма = 3—5 миллим. Что касается внутреннихъ массъ бетона, то онѣ остаются неповрежденными вслѣдствіе запаса внутренней теплоты, образуемой при химическихъ процессахъ твердѣнія портландъ-цемента.

Но, вообще говоря, существующія на этотъ счетъ строительно-полицейскія правила въ разныхъ странахъ или запрещаютъ производство бетонныхъ работъ въ морозы или ставятъ различныя стѣснительныя условія.

Такъ «Техническія условія для желѣзобетонныхъ сооружений Русскаго Министерства Путей Сообщенія» совершенно запрещаютъ веденіе работъ при температурѣ ниже 0°; «При температурѣ же ниже 0° веденіе работъ на открытомъ воздухѣ безусловно воспрещается.» Германскія «Императорскія постановленія относительно производства работъ при желѣзобетонныхъ конструкціяхъ въ гражданскихъ сооруженияхъ (Amtliche Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten)» по этому вопросу предписываютъ слѣдующее:

„Работать при морозѣ разрѣшается только въ томъ случаѣ, если исключена возможность вреднаго его дѣйствія. При этомъ вовсе не разрѣшается употреблять мерзлые матеріалы.

Когда послѣ продолжительныхъ морозовъ (§ 12) наступаетъ болѣе теплая погода, то къ работѣ можно приступить лишь послѣ того, какъ получено будетъ разрѣшеніе отъ строительно-полицейскихъ властей.

До достаточнаго отвердѣнія сооруженіе должно быть защищено отъ вліянія мороза и предварительнаго высыханія, равно какъ отъ сотрясенія и нагрузокъ.

Если въ теченіе времени твердѣнія наступаетъ морозъ, то, имѣя въ виду, что морозъ замедляетъ твердѣніе бетона, необходимо увеличить всѣ указанные выше сроки (раскружаливанія) на время продолжительности морозовъ.“

Въ такомъ же духѣ высказываются и многіе авторы трудовъ по бетонному дѣлу.

Такъ Керстенъ придерживается такого мнѣнія: «Во всякомъ случаѣ при температурѣ въ (—5°) Цельсія и ниже, бетонныя работы слѣдуетъ воспретить безъ всякихъ оговорокъ.»<sup>1)</sup>

## § 25. Опытныя данныя о дѣйствіи морозовъ на растворы и бетоны.

Въ настоящаго времени произведено сравнительно немного опытовъ по изученію вліянія низкихъ температуръ на прочность растворовъ и бетоновъ.

Приведемъ результаты нѣкоторыхъ извѣстныхъ въ этомъ направленіи изслѣдованій.

<sup>1)</sup> Керстенъ. Желѣзобетонныя сооружения. Переводъ Каменецкаго, С. Петербургъ 1912 г.

Особенно обширный опытный материал по данному вопросу далъ проф. Гермеръ въ своемъ сочиненіи: „Einfluss niederer Temperaturen (Frost) auf die Festigkeit von Mörtel, Mauerwerk und Beton. Prof. H. Germer, Berlin.<sup>1)</sup>

Проф. Гермеръ свои опыты производилъ при помощи особаго холодильника, температура котораго понижалась до  $-18^{\circ}$  Цельсія.

При постановкѣ опытовъ температура въ холодильнике мѣнялась, какъ вслѣдствіе нагрѣванія окружающимъ воздухомъ, такъ и вслѣдствіе отдачи теплоты испытуемыми бетонными кубами, въ слѣдующихъ предѣлахъ:

при помѣщеніи испытуемыхъ образцовъ . . . . .	$0^{\circ}$	
черезъ 3—4 часа . . . . .	$3^{\circ}$ — $4^{\circ}$	холода
черезъ 12 часовъ . . . . .	$6^{\circ}$ — $7^{\circ}$	„
черезъ 18 часовъ и до окончанія опыта . . . . .	$9^{\circ}$ — $11^{\circ}$	„

Образцы, положенные въ холодильникъ, обыкновенно черезъ два дня оказывались совершенно промерзшими.

Бетонные образцы для испытанія приготовлялись съ хрящемъ не крупнѣ горошины и со щебнемъ изъ булыжниковъ кубической формы со стороны въ среднемъ 4 сант. Прибавленіе воды было обычно  $14\%$  по объему.

Для выясненія различнаго вліянія мороза Гермеръ произвелъ слѣдующіе опыты:

1. Образцы 5 разъ послѣдовательно отвердѣвали одинъ день въ холодильникѣ при температурѣ  $-6^{\circ}$  до  $-11^{\circ} C$  и одинъ день на воздухѣ.
2. Образцы отвердѣвали все время въ холодильникѣ.
3. Образцы отвердѣвали попеременно 3 дня въ холодильникѣ и одинъ день на воздухѣ (такихъ періодовъ 4), и 2 дня въ холодильникѣ и одинъ день на воздухѣ (такихъ періодовъ 5).

#### А. Сопротивленіе на раздавливаніе бетонныхъ кубовъ.

Испытывались бетонные кубики со стороны въ 20 сант., при чемъ изъ трехъ испытаній выводилось среднее.

Д) Дѣйствіе мороза: въ теченіе 10 дней образецъ попеременно одинъ день помѣщался въ холодильникѣ, одинъ день отвердѣвалъ внѣ его.

а) бетонъ съ хрящемъ—пропорціи: 1:3 и 1:6.

Передъ тѣмъ, какъ образцы подвергались дѣйствію мороза, вліянія возраста ихъ устанавливались такимъ образомъ: они отвердѣвали предварительна на воздухѣ  $\frac{1}{4}$  дня, 1 день, 3 дня и 7 дней. Дѣйствіе мороза на послѣдніе образцы,—твердѣшіе въ теченіе 7 дней на воздухѣ, оказалось незначительнымъ; но по мѣрѣ сокращенія времени предварительнаго твердѣнія на воздухѣ, дѣйствіе это усиливалось. Пониженіе прочности доходило до  $44\%$  для жирныхъ и  $50\%$  для тощихъ образцовъ по сравненію съ отвердѣваніемъ на воздухѣ.

в) бетонъ со щебнемъ—пропорціи: 1:3:3 и 1:6:6.

Въ этихъ образцахъ, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, дѣйствіе мороза уменьшается по мѣрѣ увеличенія періода предварительнаго отвердѣванія. Однако свѣжій бетонъ со щебнемъ менѣе поддается вліянію мороза, чѣмъ свѣжій бетонъ съ хрящемъ.

Для данаго случая имѣли мѣсто потери прочности по сравненію съ отвердѣваніемъ на воздухѣ, приведенныя въ таблицѣ № 19.

II. Дѣйствіе мороза непрерывно въ теченіе 10 дней.

Бетонъ съ хрящемъ	1:3	предварительное отвердѣваніе на воздухѣ въ теченіе: $\frac{1}{4}$ дня, 3 дней и 7 дней.
	1:6	
„ со щебнемъ	1:3:3	
	1:6:6	

<sup>1)</sup> Цементъ, камень и желѣзо. 1912 г. № 1, стр. 17.

ТАБЛИЦА № 19.

С м ѣ с ь	Периодъ предварительнаго отвердѣванія		
	1/4 дня	3 дня	7 дней
1:3:3	34 %	27 %	21 %
1:6:6	47 %	31 %	13 %

Изъ опытовъ устанавливается уменьшеніе прочности для всѣхъ бетоновъ по сравненію съ отвердѣваніемъ на воздухѣ; при этомъ уменьшеніе прочности для тощихъ смѣсей значительно, чѣмъ для жирныхъ, и для бетона со щебнемъ больше, чѣмъ для бетона съ гравіемъ.

Во время пребыванія на морозѣ приращеніе прочности равно нулю. Въ образцахъ, предварительно отвердѣвавшихъ 1/4 дня на воздухѣ, вредное вліяніе мороза выразилось въ появленіи трещинъ. Изъ этихъ опытовъ выяснилось также, что продолжительное вліяніе мороза (въ данномъ случаѣ 10 дней) оказывалось вреднѣе, чѣмъ смѣна мороза и обыкновенной температуры (пятикратная въ теченіе дня).

III. Дѣйствіе мороза: 4 раза въ теченіе 3-хъ дней морозъ, по сравнению съ теченіемъ одного дня отвердѣванія на воздухѣ; затѣмъ 5 разъ въ теченіе двухъ дней морозъ и одинъ день отвердѣванія на воздухѣ.

При этихъ опытахъ выяснилось значительное пониженіе прочности по сравненію съ отвердѣваніемъ въ тепломъ воздухѣ для всѣхъ бетоновъ, исключая образцовъ предварительно отвердѣвавшихъ на воздухѣ въ теченіе 7 дней; въ послѣднихъ оказывалось некоторое кажущееся увеличеніе прочности.

Во всякомъ случаѣ, при опредѣленіи прочности образцовъ, принимать во вниманіе не только прочность, но и образованіе трещинъ, то и для этихъ послѣднихъ образцовъ вліяніе мороза оказывается вреднымъ.

Въ таблицѣ № 20 приведена въ процентахъ разниця между прочностью на изломъ и сопротивленіемъ первымъ трещинамъ.

ТАБЛИЦА № 20.

Составъ бетона.	Отвердѣваніе въ воздухѣ %	Отвердѣваніе на морозѣ послѣ предварительнаго отвердѣванія въ теченіе	
		1/4 дня %	7 дней %
1:3	13	56	34
1:3:3	25	50	50
1:6:6	33	45	27

Испытаніе образцовъ, бывшихъ на морозѣ, дало большую прочность, чѣмъ испытаніе образцовъ до или послѣ дѣйствія мороза. Отсюда слѣдуетъ, что прочность готовыхъ сооружений въ теченіе дѣйствія мороза подъ его вліяніемъ повышается.

### Б. Вліяніе мороза на сцѣпленіе между бетономъ и арматурой

Для опредѣленія вліянія мороза на сцѣпленіе бетона съ арматурой Гермеръ произвелъ опыты съ круглымъ желѣзомъ діаметромъ 1 сант. и бетономъ состава 1:3 и 1:6.

Желѣзные стержни для опыта брались въ двухъ видахъ: одинъ разъ влажные, другой—смазанные цементнымъ молокомъ.

Образцы подвергались предварительному отвердѣванію:  $\frac{1}{4}$  дня, 1 день, 3 дня и 7 дней. Температура —  $10^{\circ}$  С.

Дѣйствіе мороза: а) пятикратно-день мороза и день оттаиванія; в) 10 дней непрерывнаго промерзанія. Опыты съ влажнымъ желѣзомъ при промерзаніи въ комбинаціи а) дали весьма важный и удивительный результатъ: сѣйленіе подѣ въліяніемъ мороза практически совершенно исчезало.

Для второй серіи опытовъ—съ желѣзомъ, смоченнымъ заблаговременно въ цементномъ молокѣ—это послѣднее Гермеръ приготавливалъ изъ порландскаго цемента и воды. Консистенція молока доходила до состоянія кашицы. Желѣзо смазывалось молокомъ при помощи висточки. При этихъ опытахъ результаты получились тоже совершенно неожиданные: сила сѣйленія бетона съ желѣзомъ при отвердѣваніи безъ дѣйствія мороза, при составѣ бетона 1:3, повышалась при смазываніи съ 15 до 54,5 кил. на кв. сант., а при составѣ бетона 1:6—съ 10,5 до 47,5 кил. на кв. сант.

Подѣ въліяніемъ мороза это увеличеніе сѣйленія не претерпѣваетъ значительнаго измѣненія; только продолжительное дѣйствіе мороза (комбинація в) обуславливаетъ въ образцахъ съ предварительнымъ отвердѣваніемъ въ теченіе  $\frac{1}{4}$  дня значительное уменьшеніе сѣйленія—до 23 кил. на кв. сант.

Въ образцахъ, подвергавшихся въ теченіе 10 дней непрерывному дѣйствію мороза при влажной арматурѣ наблюдалось почти совершенное исчезновеніе сѣйленія при условіи предварительнаго отвердѣванія не болѣе 7 дней. Періодъ отвердѣванія образцовъ (состава 1:3 и 1:6) достигалъ 5 и 10 недѣль. Для этихъ образцовъ также наблюдалось удивительное увеличеніе силы сѣйленія при смазываніи. По сравненію съ отвердѣваніемъ на воздухѣ наблюдалось значительное пониженіе силы сѣйленія вслѣдствіе дѣйствія мороза на свѣже изготовленные образцы. Даже болѣе старые образцы страдали подѣ въліяніемъ мороза. Отсюда, слѣдуетъ, что продолжительный морозъ дѣйствуетъ болѣе вредно, чѣмъ смѣна холода и тепла.

Профессоръ Вьелюбскій <sup>1)</sup> производилъ опыты съ восьмерками. Для опытовъ былъ взятъ составъ бетона 1:3. Образцы черезъ 7 дней твердѣнія на открытомъ воздухѣ (не на морозѣ) дали сопротивленіе отъ 29 до 35 кил. на кв. сант. Два образца, послѣ 4 часовъ твердѣнія на открытомъ воздухѣ, были выставлены на морозъ  $10^{\circ}$  непосредственно. Черезъ 7 дней (изъ нихъ 6 дней на морозѣ) образцы были испытаны. Сопротивленіе ихъ оказалось отъ 4 до 5 кил. на кв. сант.

Одинъ образецъ, послѣ 6 часовъ твердѣнія на открытомъ воздухѣ, былъ выставленъ на морозъ отъ  $6^{\circ}$  до  $10^{\circ}$ . Черезъ 7 дней сопротивленіе его оказалось 5 кил. на кв. сант.

Затѣмъ черезъ 3 дня его положили въ воду нормальной температуры, гдѣ онъ оставался 4 дня и черезъ 7-дней далъ сопротивленіе 28 кил. на кв. сант. Такимъ образомъ образцы, подвергшіеся сначала въ теченіе 7 дней въліянію мороза затѣмъ 3 дня твердѣвшіе на воздухѣ и наконецъ пролежавшіе въ теченіе 4 дней въ водѣ нормальной температуры, при испытаніи показали, что процессъ твердѣнія послѣ оттаиванія продолжается.

Въ 1914 году инженеръ Гамерслей-Генанъ <sup>2)</sup> сообщилъ во французской Академіи Наукъ о результатахъ своихъ наблюденій надъ возведеніемъ бетонной кладки при низкихъ температурахъ и надъ дѣйствіемъ мороза на бетонъ. По мнѣнію этого изслѣдователя морозъ имѣетъ существенное въліяніе на сопротивленіе бетона только въ теченіе первыхъ двухъ дней отъ начала схватыванія. Въліяніе мороза заключается въ нѣкоторомъ замедленіи схватыванія. Безусловно вредное въліяніе имѣетъ послѣдовательная смѣна морозовъ и оттепелей до окончанія схватыванія бетона.

<sup>1)</sup> Цементъ. 1912 г. № 8, стр. 367.

<sup>2)</sup> Журналъ Министерства Путей Сообщенія. 1915 г., книга IV. Въліяніе мороза на бетонную кладку.

Для безопасной кладки бетона зимой Гамерслей-Генанъ совѣтуетъ нагрѣвать смѣшиваемыя составныя части бетона и затѣмъ пользоваться нагрѣвательными приборами для поддержанія температуры кладки на нѣсколько градусовъ выше нуля въ теченіе двухъ дней. И, производствѣ бетона большими массами въ холодную погоду, но при не очень большихъ морозахъ, можно покрывать бетонную кладку мѣшками и соломой. При большихъ же морозахъ необходимо работы исполнять въ теплякѣ. Въ крайнемъ случаѣ можно ограничиваться устройствомъ палатки, внутри которой, при помощи печей или жаропроводовъ, поддерживается температура на нѣсколько градусовъ выше нуля.

Растворъ, уже схватившійся, по наблюденію Гамерслей-Генана, хорошо сопротивляется морозу. Исключеніе составляютъ сооруженія, которыя попеременно то покрываются водою, то обнажаются; такія сооруженія могутъ быть разстроены морозомъ и послѣ схватыванія бетонной кладки. Гамерслей-Генанъ совѣтуетъ въ холодное время покрывать подобнаго рода сооруженія слоемъ соломы и досками.

Въ шведскомъ инженерномъ журналѣ<sup>1)</sup> за 1913 г. (Tidskrifti Forfikation) имѣются указанія относительно производства бетонныхъ работъ во время стужи и мѣръ осторожности для устраненія вреднаго вліянія холода, замѣствованныхъ изъ „Mitteilungsblatt“ 1913 г.

1. При приготовленіи бетона слѣдуетъ приливать только такое количество воды, сколько можетъ войти въ химическое соединеніе, такъ какъ не связанная химически вода при замерзаніи можетъ разорвать массу. Необходимое количество воды принимается приблизительно равнымъ 15% объема смѣси песка и щебня. Во время мороза слѣдуетъ подогревать воду. Песокъ и щебень не должны употребляться въ дѣло въ мерзломъ состояніи; для избѣжанія этого они должны также подогреваться. Температура готовой смѣси должна быть около  $+15^{\circ}\text{C}$ . Бетонъ полезно изготовлять въ легко переносимыхъ деревянныхъ сараяхъ, въ которыхъ возможно поддерживать эту температуру при помощи противоморозныхъ печей или жаровень.

2. Такъ какъ схватываніе цемента, а также бетона, замедляется съ пониженіемъ температуры, то для ускоенія этого процесса надо употреблять быстро схватывающійся цементъ, но сопротивленіе бетона при этомъ выходитъ меньше, чѣмъ при употребленіи медленно схватывающагося цемента.

3. Схватываніе медленно схватывающагося цемента можно ускорить прибавленіемъ соды. При температурѣ отъ  $(-2^{\circ})$  до  $(-10^{\circ}\text{C})$  достаточно примѣсь 1 кгр. соды на 15 литр. воды; при морозѣ болѣе  $(-10^{\circ})$  это количество полагается на 10 литр. Соду растворяютъ въ части употребляемой воды (2 ч. воды на 1 ч. соды) и приливаютъ этотъ растворъ въ остальную водѣ. Перемѣшанная въ сухомъ видѣ масса цемента, песка и щебня, предварительно обливается водою; но температура смѣси не должна быть болѣе  $(-15^{\circ}\text{C})$ . Примѣшиваніе другихъ солей, въ особенности глауберовой соли, не целесообразно, такъ какъ онѣ причиняютъ образованіе пустотъ и дѣлаютъ бетонъ гигроскопичнымъ. Сода производитъ подобное же дѣйствіе, но оно можетъ быть устранено смываніемъ (?) соды.

Опытъ показали, что бетонъ, становясь вслѣдствіе сырости проводникомъ электричества, подвергается разрушенію около заключающейся въ немъ желѣзной арматуры, если электрической токъ дѣйствуетъ болѣе продолжительное время. Если можно предвидѣть, что бетонъ, а въ особенности желѣзо-бетонъ, можетъ быть подверженъ дѣйствію электрическаго тока, то надо избѣгать употребленія солей, увеличивающихъ способность бетона проводить электричество и способствующихъ, слѣдовательно, его разрушенію.

Для сужденія о пригодности разныхъ имѣющихся въ продажѣ средствъ, рекомендованныхъ для предохраненія бетона отъ вреднаго вліянія мороза, нѣтъ достаточныхъ данныхъ о дѣйствіи ихъ.

Опытъ примѣненія одного изъ такихъ противоморозныхъ средствъ подъ названіемъ „Calcidum“ (Calcidum) показалъ, что оно уменьшаетъ прочность бетона.

<sup>1)</sup> Инженерный журналъ № 8. Августъ 1914 г. стр. 59. „Производство бетонныхъ работъ въ пром. морозѣ“.



4. Въ холодное время всегда слѣдуетъ распределять и обрабатывать бетонъ быстро для того, чтобы не терялась образующаяся при схватываніи теплота.

Желательно возводить сплошные бетонные массивы по возможности безъ перерыва для чего слѣдуетъ производить работу, въ случаѣ надобности, днемъ и ночью. Всѣ закрываемыя въ бетонъ желѣзныя части слѣдуетъ подогревать и покрывать тонкимъ слоемъ цементнаго раствора, или же ихъ покрываютъ грѣтымъ цементнымъ растворомъ такъ какъ бетонъ почти совершенно теряетъ на холодѣ способность сцепляться съ желѣзомъ.

5. Свѣжеуложенный бетонъ надо предохранять отъ охлажденія, по крайней мѣрѣ въ теченіе трехъ сутокъ, покрываніемъ поверхностей, непосредственно подвергающихся дѣйствію мороза, тростникомъ, толстыми соломенными матами, деревянною обшивкою, мѣшками съ сухими листьями, сухимъ пескомъ и т. п. Въ этотъ промежутокъ времени бетонъ легко подвергается поврежденію, въ особенности открытыя поверхности его.

При болѣе значительномъ морозѣ, кромѣ того, полезно устраивать отопленіе внутри оконченныхъ постройкой печкою печами или жаровнями съ коксомъ, причемъ слѣдуетъ закрывать имѣющіяся отверстія. Полезно ставить жаровни на поверхностяхъ, покрытыхъ слоемъ песка. Когда песокъ нагрѣлся, его можно засыпать послѣдовательно землей, которая, при очень сильныхъ морозахъ, въ свою очередь также можетъ нагрѣваться жаровнями съ горящимъ коксомъ.

Надо, однако, замѣтить, что бетонъ можно предохранять отъ вреднаго вліянія мороза примѣненіемъ описанныхъ предохранительныхъ мѣръ, но во время мороза онъ представляетъ гораздо меньшее сопротивленіе, чѣмъ бетонъ, изготовленный при благоприятной обстановкѣ. Холодъ замедляетъ твердѣніе бетона и можетъ даже въ нѣкоторыхъ случаяхъ совершенно препятствовать таковому. Послѣ прекращенія дѣйствія мороза бетонъ мало помалу достигаетъ нормальной твердости, но таковая можетъ быть достигнута слѣдующимъ образомъ: бетонъ можно подвергнуть только по прошествіи значительнаго промежутка времени.

6. Если необходимо ускорить процессъ твердѣнія при продолжающемся сильномъ морозѣ, то полезно выполнять бетонныя работы по частямъ подъ простымъ переноснымъ непрерывно отапливаемымъ шалашомъ или деревяннымъ сараемъ, въ которомъ вновь сложенный бетонъ могъ бы оставаться въ теченіе недѣли.

Въ журналѣ *Railiv Review* <sup>1)</sup> за 1914 г. помѣщена статья «Бетонныя работы зимою». Въ заголовкѣ указывается, что путемъ подогреванія матеріаловъ и принятія мѣръ предосторожности можно производить въ большинствѣ случаевъ бетонныя работы и зимою во время морозовъ.

Въ 1888—1891 годахъ въ лабораторіи службы пути Орловско-Витебской жел. дороги инженеромъ А. И. Лебединскимъ <sup>2)</sup> производились опыты надъ цементными растворами для выясненія слѣдующихъ вопросовъ:

1. Возможно ли производить во время морозовъ каменную кладку на цементномъ растворѣ съ желаемою прочностью.
2. Какіе составы цементныхъ растворовъ обладаютъ наибольшимъ сопротивленіемъ морозу.
3. При какой наиболѣе пониженной температурѣ сопротивленіе цементныхъ растворовъ остается удовлетворительнымъ.
4. Въ какой мѣрѣ примѣсь къ цементнымъ растворамъ соли ( $NaCl$ ) и хлористой извести ( $CaCl_2$ ) можетъ быть полезна, какъ въ отношеніи прочности раствора, такъ и въ отношеніи удобства производства работъ на морозѣ.
5. Получается ли при устройствѣ каменной кладки зимою на цементномъ растворѣ такое же соединеніе раствора съ камнемъ, какъ и при кладкѣ лѣтомъ.

<sup>1)</sup> *Railiv Review* 1914 г., томъ 55, № 21, стр. 627.

<sup>2)</sup> Протоколы засѣданій VII, VIII и IX совѣщательныхъ сѣздовъ инженеровъ службы пути. Докладъ инженера А. И. Лебединскаго «Опыты надъ цементными растворами въ лабораторіи Орлово-Витебской жел. дороги».

6. Какія условія вообще нужно соблюдать при изготовленіи растворовъ для кладки на морозъ и при самомъ производствѣ кладки, чтобы получить удовлетворительные результаты. На основаніи цѣлой серіи опытовъ, очень тщательно обставленныхъ, по первымъ тремъ вопросамъ можно сдѣлать слѣдующіе выводы.

Опыты, произведенные для выясненія разницы во времени схватыванія цемента, затвореннаго съ солью, хлористой известью и на чистой водѣ, показали слѣдующее.

Температура	H <sub>2</sub> O + 10% NaCl	H <sub>2</sub> O + 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> % CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
— 12 R	1 ч. 5 м.	2 ч.	35 м.
— 8 R	1 ч. 55 м.	2 ч. 15 м.	48 м.

Изъ этой таблицы видно, что наибольшій срокъ схватыванія или, вѣрнѣе сказать, заморзанія образцовъ оказался самымъ продолжительнымъ для раствора цемента хлористой известью, затѣмъ съ солью; срокъ же схватыванія цемента, затвореннаго на чистой водѣ, оказался самымъ незначительнымъ. При нормальныхъ условіяхъ срокъ схватыванія цемента, взятаго для опыта — 6<sup>1</sup>/<sub>2</sub> часовъ.

Цементные растворы съ малымъ количествомъ песка (1 : 1, 1 : 2) на водѣ, содержащей соль, вначалѣ оказали немного большее сопротивленіе, чѣмъ растворы на чистой водѣ. Но по истеченіи 6 мѣсяцевъ сопротивленіе цемента, затвореннаго на водѣ, содержащей соль, оказалось ниже сопротивленія цемента, затвореннаго на чистой водѣ.

Болѣе тощіе цементные растворы на водѣ, содержащей соль, оказали меньшее сопротивленіе, чѣмъ растворы на прѣсной водѣ.

Сопротивленіе цемента, затвореннаго на водѣ, содержащей хлористую известь, оказалось немного выше сопротивленія растворовъ на водѣ съ солью и на чистой водѣ; но большее количество испытаній съ хлористой известью не даетъ возможности рѣшить, насколько примѣненіе хлористой извести целесообразнѣе примѣненія соли.

На основаніи всѣхъ сдѣланныхъ опытовъ выведено слѣдующее заключеніе:

1. Кладку на цементномъ растворѣ можно производить съ достаточной прочностью на морозъ до —15° R. и въ крайнемъ случаѣ въ —20 R., при составѣ растворовъ: 1 ч. цемента на 1 и 2 части песка.

2. Составленіе растворовъ должно производиться на водѣ съ примѣсью 10% NaCl и 1%, CaCl (лучше брать первое) въ закрытомъ помѣщеніи и вообще при температурѣ 0° (по возможности же около +15° R.).

По остальнымъ поставленнымъ вопросамъ получены изъ цѣлой серіи опытовъ нижеслѣдующія данныя.

Вліяніе мороза на сопротивленіе цементныхъ растворовъ определено испытаніемъ образцовъ, возрастомъ 2 г. 3 м. Образцы состава (1 : 3) затворялись на чистой водѣ и на водѣ съ примѣсью 10% NaCl. Условія опыта приведены въ прилагаемой таблицѣ № 21.

ТАБЛИЦА № 21.

Срокъ испытанія	Время нахождения на воздухѣ.	1 ч. цем. съ 3 ч. песка H <sub>2</sub> O + 10% NaCl	1 ч. цем. съ 3 ч. песка H <sub>2</sub> O	t <sub>1</sub> <sup>0</sup>	t <sub>11</sub> <sup>0</sup>
		Среднее сопротивленіе серіи въ кил.		R.	R.
1 г. 3 м.	1 г. 2 м. 29 д.	40,75	44,23	—10	—29
2 г. 3 м.	2 г. 2 м. 29 д.	41,02	44,60	—13	—29

Примѣчаніе. Всѣ образцы подвергались испытанію въ оттаенномъ состояніи черезъ 24 часа  $t_0$  — температура (градусы Реомюра), которой подвергались образцы немедленно по изготовленіи.  $t_{00}$  — наибольшее пониженіе температуры, которой подвергались образцы до испытанія.

Лебединскій приходитъ къ заключенію, что въ общемъ разница въ увеличеніи сопротивленія какъ для растворовъ съ солью, такъ и безъ соли послѣ 1 года 3 мѣс., и 2 лѣт. 3 мѣс., оказалась очень незначительной и можно предполагать, что послѣ болѣе продолжительнаго времени сопротивленіе едва ли значительно увеличится. Полученные результаты вполне согласуются съ результатами, полученными французскимъ инженеромъ Dutoit.

Для выясненія вліянія мороза на сдѣяніе цементныхъ растворовъ (1:3) съ кирпичемъ, известнякомъ и песчаникомъ, два камня или кирпича соединялись растворомъ крестообразно. Соединенные растворомъ камни помещались въ сквозномъ досчатомъ сарайчикѣ; при этомъ, для доставленія растворамъ необходимой влаги, камни время отъ времени поливались водой. Образцы испытывались черезъ 8 мѣсяцевъ,  $t_0 = (-13 R)$ ;  $t_{00} = (-28 R)$ . Изъ серіи опытовъ выяснилось, что сдѣяніе кирпичей, лежавшихъ на воздухѣ, съ растворомъ на соленой водѣ (10% NaCl) оказалось значительно выше, чѣмъ съ растворомъ безъ соли: среднее сопротивленіе сдѣянія на 1 кв. сант. для растворовъ съ солью получило въ 1,65 кил. и для растворовъ безъ соли въ 0,39 кил.

Сдѣяніе растворовъ съ известнякомъ и песчаникомъ оказалось тоже выше при соленой водѣ. По отдѣленіи кирпичей и камней отъ растворовъ, на поверхности первыхъ замѣчались налеты выдѣлившейся изъ растворовъ свободной извести. Это явленіе наблюдалось какъ на образцахъ съ растворами съ солью, такъ и безъ соли.

Кромѣ лабораторныхъ испытаній надъ цементными растворами, инженеромъ Лебединскимъ произведена въ видѣ опыта кирпичная кладка стѣнъ на морозѣ: одна стѣна была сложена на растворѣ съ солью (составъ 1 ч. цем. на 3 ч. песка), другая на такомъ же составѣ раствора, но приготовленномъ на горячей водѣ (до  $100^{\circ} C$ ). Для того, чтобы получить данныя при разной температурѣ наружнаго воздуха, кладка дѣлалась не сразу, а по нѣскольку рядовъ въ день, при чемъ максимальная температура была  $(-5^{\circ} R)$ , минимальная  $(-13^{\circ} R)$ .

Смѣсь цемента съ пескомъ затворялась въ помещеніи съ температурою выше  $0^{\circ}$  и небольшими порціями. При кладкѣ большее удобство представлялъ растворъ съ солью, растворъ же безъ соли, затворенный на кипяткѣ, при температурѣ ниже  $(-10^{\circ})$  весьма скоро остывалъ, образуя комья, неудобные для кладки.

Послѣ первой оттепели на стѣнкахъ кладки, произведенной съ растворомъ соли, замѣтно было выдѣленіе ея въ видѣ легкаго налета.

Твердѣніе цемента въ обоихъ случаяхъ послѣ первой оттепели оказалось весьма значительнымъ. По прошествіи 9 мѣсяцевъ кладка оказалась весьма прочною, ни въ чемъ не отличающейся отъ кладокъ, произведенныхъ при нормальныхъ условіяхъ. Отрывать кирпичи отъ кладки, не прибѣгая къ какому нибудь орудію, было невозможно.

Инженеръ Лебединскій, сдѣлалъ серію опытовъ для опредѣленія выщелачиванія соли изъ цементныхъ растворовъ. Всѣ опыты надъ растворами съ солью указывали на ея выдѣленіе, поэтому было интересно прослѣдить, по истеченіи какого времени пребыванія образцовъ въ водѣ, какой процентъ соли выщелачивается?

Были сдѣланы двѣ серіи образцовъ изъ раствора 1 ч. цемента съ 3 частями песка, затвореннаго водой, содержащей 10% NaCl.

Результаты опытовъ получились слѣдующіе: образцы, не погруженные въ воду, содержали 0,98% соли, не разбитые и находившіеся 2 мѣсяца въ водѣ—0,18%; въ образцахъ же разбитыхъ и пролежавшихъ такое же время въ водѣ были только неопредѣлимые признаки соли.

1) Значенія  $t_0$  и  $t_{00}$  объяснены въ примѣчаніи къ таблицѣ № 21.

Въ Дрезденѣ замѣтили продолженіе схватыванія черезъ полгода: работы производились въ декабрѣ, всю зиму онѣ простояли, а весной схватываніе продолжалось.

## § 26. Установившіеся въ практикѣ способы производства бетонныхъ работъ на морозѣ.

Не смотря на стѣсненія официальными инструкціями, строительно-полицейскими законами и тому подобными административными мѣрами съ одной стороны и отрицательными мнѣніями по этому поводу теоретиковъ съ другой стороны, практика шла своей дорогой и подъ предлогомъ самыхъ разнообразныхъ уважительныхъ причинъ бетонныя работы, начавшись въ строительный сезонъ, заходили въ глубокую осень и продолжались на морозѣ. Жизнь шла впереди правилъ и, какъ всегда бываетъ, пробивала новые пути.

Допускается, въ видѣ исключенія, строить и въ періодъ морозовъ нѣкоторые бетонныя сооруженія, не требующія чистой отдѣлки наружныхъ поверхностей, какъ то: фундаменты, толстыя стѣны и т. д., но съ тѣмъ, чтобы онѣ, послѣ періода морозовъ, оттаяли и окрѣпли.

Въ такихъ случаяхъ считается необходимымъ<sup>1)</sup>:

- 1) примѣненіе наиболѣе доброкачественныхъ цементовъ;
- 2) полное удаленіе съ поверхностей рабочихъ слоевъ цементнаго молока, выступающаго наружу при избыткѣ воды.

На практикѣ считаются рациональными слѣдующія мѣры для устраненія вреднаго дѣйствія морозовъ на еще неокрѣпшіе бетоны.

1) Если бетонная кладка производится при температурѣ ниже нуля, то считается необходимымъ:

- а) повысить температуру составныхъ частей бетона,
- б) или понизить температуру замерзанія воды, и
- в) производить работы въ теплякахъ.

II. Если же приходится бетонную кладку производить при температурѣ выше нуля, то считаемъ уже кладка эта подвергается дѣйствію мороза въ періодъ схватыванія и начала тверднѣнія, то считается необходимой одна изъ слѣдующихъ мѣръ:

- а) понизить точку замерзанія воды,
- б) ускорить схватываніе и тверднѣніе, или
- в) сохранять въ кладкѣ температуру выше нуля.

Повышеніе температуры составныхъ частей бетона полезно въ двухъ отношеніяхъ: во-первыхъ ускоряется схватываніе и тверднѣніе цемента, во-вторыхъ увеличивается запасъ цемента въ бетонной кладкѣ. Благодаря этимъ обстоятельствамъ температура бетонной кладки повышается до нуля и ниже уже въ то время, когда нѣкоторое количество воды вступило въ химическое соединеніе съ цементомъ, вслѣдствіе чего и бетонъ пріобрѣтъ нѣкоторую прочность.

Этотъ способъ примѣнялся съ успѣхомъ во многихъ случаяхъ въ Англии и Америкѣ при морозахъ до  $(-5^{\circ})$  и болѣе градусовъ.

Работы ведутся въ общихъ чертахъ слѣдующимъ образомъ<sup>1)</sup>.

Приготовленіе бетона производится въ тепломъ помѣщеніи. Всѣ инертныя составныя части бетона предварительно согрѣваются струей пара. Они не должны содержать въ себѣ комковъ, льда и снѣга.

Вода, получающаяся отъ конденсаціи пара, насыщаетъ щебень и песокъ.

Температура воды, приливаемой при перемѣшиваніи должна быть не ниже  $+15^{\circ} \text{C}$ .

Передъ укладкой бетона, всѣ поверхности формъ очищаются отъ льда и согрѣваются струей пара въ теченіе 15—20 минутъ. Послѣ этого быстро производится кладка бетона.

Когда кладка закончена, всё открытыя ея поверхности покрываются соломенными матами, мѣшками, рожами или досками.

Подобный способъ производства работъ при температурѣ ниже нуля особенно примѣнимъ для кладки толстыхъ стѣнъ и прочихъ массивныхъ сооружений, такъ какъ чѣмъ больше объемъ кладки, тѣмъ медленнѣе происходитъ ея охлажденіе.

При постройкѣ бетоннаго акведука на каналѣ Иллинойсъ—Миссисипи <sup>1)</sup> при морозѣ въ 9° Цельсія работа велась такимъ образомъ.

Для согрѣванія матеріаловъ во вращающійся барабанъ бетоньерки былъ проведенъ по трубѣ отработавшій паръ отъ двигателя. При перемѣшиваніи, продолжавшемся 3 минуты, температура составныхъ частей бетона поднималась до + 38° С. Укладка бетона велась непрерывно слоями толщиной 6 дюймовъ. При перерывахъ на ночь поверхность бетона покрывалась дюймовыми досками.

Доски укладывались на подкладки, а сверху покрывались брезентомъ.

Въ промежутки между бетономъ и досками пускался паръ по проложеннымъ трубамъ.

Въ законченныхъ участкахъ такое согрѣваніе бетона поддерживалось непрерывно въ теченіе двухъ сутокъ. Затѣмъ покрытие разбиралось и бетонъ подвергался дѣйствію мороза. Снизу бетонный сводъ вполне предохранялся отъ дѣйствія мороза опалубкой изъ двухдюймовыхъ досокъ.

Пониженіе температуры замерзанія воды на практикѣ обыкновенно достигается примѣсью поваренной соли. Иногда примѣняется примѣсь хлористаго кальція въ количествѣ до 5% отъ вѣса цемента.

Но о хлористомъ кальціи слѣдуетъ замѣтить слѣдующее.

Добавка хлористаго кальція въ количествѣ меньшемъ 2% отъ вѣса цемента замедляетъ схватываніе цемента; добавка отъ 2% до 5% наоборотъ ускоряетъ процессъ схватыванія <sup>2)</sup>.

Но хлористый кальцій обладаетъ большою гигроскопичностью, которая способствуетъ отсырѣнію бетона, это обстоятельство сильно ограничиваетъ примѣненіе хлористаго кальція.

Для пониженія температуры замерзанія воды примѣняются и другія вещества: сода, алкоголь, сахаръ и глицеринъ. Но объ этихъ веществахъ по данному вопросу имѣется очень мало практическихъ данныхъ <sup>3)</sup>.

Примѣсь къ водѣ поваренной соли вызываетъ слѣдующія измѣненія свойствъ растворовъ и бетоновъ изъ портландъ-цемента <sup>3)</sup>.

1) Добавка отъ 2% до 4% увеличиваетъ немного крѣпость.

2) Добавка 10% соли значительно замедляетъ схватываніе и понижаетъ крѣпость въ начальные сроки твердѣнія. Къ концу года крѣпость приближается къ крѣпости растворовъ и бетоновъ, приготовленныхъ на прѣсной водѣ.

3) Добавка соли увеличиваетъ гигроскопичность бетона.

4) На наружныхъ поверхностяхъ сооружений появляется бѣлый налетъ вслѣдствіе отаженія соли при испареніи воды.

Какъ видимъ, примѣсь соли къ водѣ при затвореніи цементныхъ растворовъ, помимо пониженія температуры замерзанія воды, влечетъ за собой и другія въ общемъ нежелаемые явленія. Въ этомъ заключается недостатокъ примѣси соли. Зависимость пониженія температуры замерзанія воды и процентовъ соли, примѣшиваемой къ водѣ рассмотрѣна ниже въ главѣ IX.

## § 27. Совмѣстное вліяніе влажности и морозовъ на бетонныя сооружения.

Совмѣстное вліяніе влажности и морозовъ на окрѣпшую бетонную кладку заключается въ слѣдующемъ. Распредѣленіе температуры въ бетонныхъ массивахъ, подверга-

<sup>1)</sup> Engineering Record, 1910 г. Vol. 61, стр. 574. Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы Петербургъ 1912 г., стр. 293.

<sup>2)</sup> Цементъ 1903 г., стр. 187.

<sup>3)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ. 1912 г., стр. 295.

щихся непосредственному дѣйствию атмосферы, не можетъ быть равномернымъ вслѣдствіе малой теплопроводности бетона. Такимъ образомъ, получается разность температуръ наружныхъ и внутреннихъ слоевъ бетона; эта разность кромѣ того увеличивается еще увеличеніемъ теплоты при процессѣ отвердѣванія бетона.

Точно также и испареніе свободной (гигроскопической) воды наибольшее получается въ наружныхъ слоевъ бетона и уменьшается внутри.

Такое неравномерное измѣненіе условій температуры и влажности вызываетъ появленіе въ бетонномъ массивѣ внутреннихъ силъ; распределеніе и величина этихъ силъ весьма отличаются отъ того случая, когда происходитъ равномерное измѣненіе объема бетона.

Наружный слой бетона, при быстромъ высушиваніи, стремится къ уменьшенію объема до предѣльной усушки. Тогда какъ внутренняя масса бетона, неизмѣняясь въ объемѣ, сопротивляется всякому измѣненію объема, неразрывно связанныхъ съ нею наружныхъ слоевъ бетона.

Если назовемъ черезъ  $E$  коэффициентъ упругости бетона при растяженіи,  $p$  — напряженіе внутреннихъ силъ при полной усушкѣ,  $\beta$  — относительную усушку бетона,  $l$  — длину разсматриваемой стѣны, то

$$p = \frac{E \cdot \beta \cdot l}{l} = E \cdot \beta \quad 1)$$

Если величина  $p$  получится больше предѣла временнаго сопротивленія бетона разрыву, то на наружной поверхности стѣны должны появиться трещины.

Въ таблицѣ № 22 приведены величины напряженій для разныхъ бетоновъ и растворовъ при полной ихъ усушкѣ 1).

ТА Б Л И Ц А № 22.

Составъ бетоновъ и растворовъ	Сроки недѣль	Относительная усушка $\beta$	Коэффициентъ упругости $E$ , кил. на кв. сант.	Напряженіе $p$ , кил. на кв. сант.	Временное сопротивленіе $R$ , кил. на кв. сант.	$\frac{p}{R}$
<b>I. Бетоны.</b>						
1 ч. цем., 3 ч. песка, 5 ч. гравія со щебнемъ . . . . .	58	0,00015	98000	14,7	9,1	1,6
1 ч. цем., 2 ч. песка, 3 ч. гравія со щебнемъ . . . . .	58	0,00015	280000	42,0	24,9	1,7
1 ч. цем., 1 ч. песка, 1 ч. гравія со щебнемъ . . . . .	58	0,00015	250000	37,5	18,1	2,1
500 кил. цем., 1/2 куб. метра песка и 1/2 куб. метра гравія . . . . .	4	0,00015	213400	31,8	9,5	3,3
<b>II. Растворы.</b>						
Чистый цементъ . . . . .	4	0,0010	180000	180	23,8	7,5
500 кил. цем. на 1 куб. метръ пес. (1:3) . . . . .	4	0,0003	210900	64,3	9,9	6,4
1 ч. цемента, 3 ч. песка . . . . .	58	0,0003	314000	94,2	21,8	4,3

Последній столбец показываетъ, что при условіи полной усушки наибольшему растрескиванію подвержены: штукатурка изъ чистаго цемента и жирные бетоны. Съ увеличеніемъ сроковъ твердѣнія и отощеніемъ бетона — уменьшается стремленіе къ растрескиванію.

Отсюда слѣдуетъ, что для предохраненія сооружений отъ появленія трещинъ необходимо какъ можно дольше поддерживать постоянную влажность наружныхъ поверхностей. Для чего необходимы систематическая поливка и предохраненіе бетона отъ непосредственнаго дѣйствія солнца и вѣтра.

Благодаря малой теплопроводности бетона рѣзкія пониженія виѣшней температуры точно также содѣйствуютъ образованію наружныхъ трещинъ въ бетонныхъ сооруженияхъ.

Предположимъ, что имѣется бетонный брусокъ съ неподвижно закрѣпленными концами. При пониженіи температуры бруска на  $t$  градусовъ, въ любомъ поперечномъ сѣченіи его появятся растягивающія усилія, напряженія которыхъ  $P = E\alpha t$ ,

гдѣ:  $E$  — коэффициентъ упругости бетона при растяженіи и  $\alpha$  — коэффициентъ расширенія.

Максимальное пониженіе температуры, вызывающее разрывъ бруска, получится изъ предыдущаго уравненія, когда  $p$  достигнетъ величины предѣла временнаго сопротивленія разрыву бетона, т. е. когда

$$t = \frac{P \max^1)}{E \cdot \alpha}$$

Въ таблицѣ № 23 вычислены напряженія, получаемыя въ наружныхъ слояхъ растворовъ при быстромъ пониженіи виѣшней температуры на  $10^{\circ}$ .

ТАБЛИЦА № 23.

Составъ растворовъ	Сроки недѣль	Кoeffициентъ расширенія $\alpha$	Кoeffициентъ упругости $E$ , кил. на кв. сант.	Напряженіе $P$ , кил. на кв. сант.	Временное сопротивление $R$ , кил. на кв. сант.	$\frac{P}{R}$
1) Чистый цементъ . . . . .	4	0,000014	180000	35,2	23,8	1,06
2) 600 кил. цем., 1 куб. метр. песка . . . . .	4	0,000012	210900	25,3	9,9	2,56
3) 1 ч. цемента, 3 ч. песка . . . . .	58	0,000012	314000	37,7	21,8	1,73

Данныя послѣдняго столбца показываютъ, что рѣзкія измѣненія условій влажности и температуры неизбѣжно вызываютъ появленіе трещинъ на наружныхъ поверхностяхъ бетонныхъ сооружений какъ нештукатуренныхъ, такъ и покрытыхъ цементной штукатуркой.

Образованіе трещинъ на наружныхъ поверхностяхъ бетонныхъ сооружений вызываетъ дальнѣйшее разрушеніе благодаря взаимодействию сырости и мороза.

Вода, замерзая, увеличивается въ объемъ; линейное расширеніе ея при замерзаніи можетъ быть принято  $\alpha=0,035$ ; коэффициентъ упругости льда при сжатіи можетъ быть принятъ  $E=23450$  кил. на кв. сант. <sup>1)</sup>.

Слѣдовательно, при замерзаніи воды въ закрытомъ сосудѣ кубической формы, по длинѣ стороны  $l$ , получается давленіе на стѣнки:

<sup>1)</sup> Житкевичъ. Бетонъ и бетонныя работы. Петербургъ. 1912 г., стр. 400, 401.

$$p = \frac{E. \alpha. 1}{1} = E. \alpha = 23450.0,035 = 820,75 \text{ кил. на кв. сант.}$$

Ледь подобно твердым смоламъ, обладаетъ особой пластичностью и текучестью.

Благодаря этому свойству ледяная масса, подъ вліяніемъ продолжительнаго дѣйствія сравнительно малыхъ силъ, измѣняетъ свою форму безъ слѣдовъ разрушенія.

Слѣдовательно, при медленномъ замерзаніи воды, заполняющей поры бетоннаго массива, увеличеніе объема ея можетъ происходить въ сторону наименьшаго сопротивленія, т. е. внаружу, или же образующійся ледь будетъ заполнять всѣ неровности и отвѣтвленія поръ.

При дальнѣйшемъ болѣе быстромъ процессѣ замерзанія воды, ледь, образовавшійся на наружной поверхности, будетъ оказывать сопротивленіе вытеканію вновь образовавшагося льда; вслѣдствіе этого нарастающая масса льда будетъ распространяться вглубь поръ и производить соотвѣтствующее давленіе на незамерзающую воду; черезъ посредство этой воды давленіе будетъ передаваться равномѣрно стѣнкамъ поръ.

На основаніи этихъ соображеній можно объяснить, почему въ дѣйствительности пористые матеріалы, какъ напр. хорошій кирпичъ, меньше подвергаются разрушенію отъ сырости и мороза, чѣмъ матеріалы слоистаго сложенія.

Въ пористыхъ матеріалахъ вода свободно проникаетъ вглубь массива до полнаго его насыщенія. Съ другой стороны пористость матеріала даетъ возможность льду проявить свою текучесть. Благодаря этому въ то время, какъ одна часть воды обращается въ ледь, увеличиваясь въ объемѣ, другая незамерзшая ея часть имѣетъ свободный доступъ вглубь массива. Отсюда слѣдуетъ, что при постепенномъ и медленномъ промерзаніи массива въ немъ не можетъ получиться значительныхъ внутреннихъ давленій до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнуто предѣлъ полнаго насыщенія массива.

## ГЛАВА IX.

### § 28. Теорія (химическихъ) растворовъ.

Если какое нибудь тѣло, имѣющее запасъ теплоты, постепенно охлаждается, то въ немъ самопроизвольно могутъ произойти только такіа измѣненія, которыя сопровождаются выдѣленіемъ теплоты. Это приложеніе закона Лешателье: «подъ вліяніемъ измѣненія внѣшнихъ условій могутъ происходить только такіа реакціи, которыя вызываютъ собою противоположное измѣненіе. Поэтому, если слѣдить за температурой тѣла, то съ того момента, когда начнется подобное измѣненіе, станетъ выдѣляться теплота; при этомъ паденіе температуры замедлится или даже совершенно прекратится пока измѣненіе не закончится. Послѣ этого пониженіе температуры будетъ продолжаться своимъ порядкомъ.

При охлажденіи воды такое имѣнно явленіе и наблюдается. Температура воды опускается равномѣрно до нуля. Послѣ чего начинается замерзаніе воды т. е. физическое измѣненіе—переходъ изъ жидкаго состоянія въ твердое. Пока этотъ процессъ не закончится, температура остается постоянной, а именно—стоитъ на нулѣ градусовъ.

Когда весь процессъ перехода воды изъ жидкаго состоянія въ твердое закончится, температура воды (льда) будетъ идти безпрепятственно далѣе. Такія точки остановки температуры называются критическими. Слѣдовательно, критическими точками называются температуры, соотвѣтствующія всякому химическому или физическому измѣненію тѣла<sup>1)</sup>.

Результаты наблюденія можно изобразить очень удобно и наглядно въ координатныхъ осяхъ, откладывая по оси абсциссъ время, а по оси ординатъ соотвѣтствующія температуры.

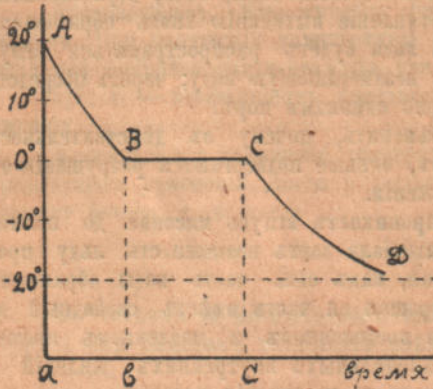


Для описаннаго случая получается диаграмма, изображенная на фигурѣ № 15.

Въ теченіе времени *ab* происходило охлажденія воды отъ  $20^{\circ}$  до  $0^{\circ}$ . Въ промежутокъ времени *bc* происходилъ переходъ воды въ твердое состояніе, а температура оставалась неизмѣнной. Затѣмъ, начиная съ момента *c*, происходило дальнѣйшее охлажденіе.

Если продѣлать такой же опытъ, взявъ вмѣсто воды растворъ 10% поваренной соли въ водѣ, то въ паденіи температуры будутъ замѣтны двѣ точки остановокъ: одна при  $(-8^{\circ})$ , другая при  $(-22^{\circ})$ .

Результаты наблюденій, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, изображены въ видѣ диаграммы на фиг. № 16.



Фиг. 15.

Въ теченіе времени *e/* температура безпрепятственно падаетъ до  $(-8^{\circ})$ ; послѣ этого паденіе на нѣкоторое время замедляется, такъ какъ часть воды замерзаетъ. Растворъ, оставшійся жидкимъ, при этомъ нѣсколько концентрируется, т. е. процентное содержаніе въ немъ соли увеличивается. Такая концентрація продолжается въ теченіе всего времени *fh*. При этомъ температура падаетъ до  $-22^{\circ}$ ; здѣсь снова ея паденіе на время *hk* приостанавливается. За это время замерзаетъ весь оставшійся еще жидкій растворъ.

При постановкѣ такого же опыта не съ 20%-нымъ растворомъ, получили бы критическія точки (остановки термометра) при  $-17^{\circ}$  и  $-22^{\circ}$  и т. д.

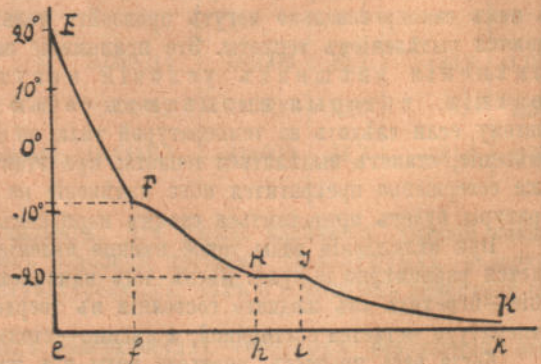
Изъ цѣлаго ряда подобныхъ опытовъ можно сдѣлать заключеніе, что во всѣхъ растворахъ поваренной соли въ водѣ, вообще говоря, существуютъ двѣ точки остановки термометра. Первая изъ нихъ—верхняя (точнѣе говоря, не остановка, а начало замедленія) мѣняетъ свое положеніе въ зависимости отъ крѣпости раствора; вторая остается постоянной при  $(-22^{\circ})$ .

Возьмемъ новую координатную систему и нанесемъ на нее рядъ пунктовъ остановокъ для всѣхъ этихъ растворовъ. На оси абсциссъ будемъ откладывать процентное содержаніе соли въ растворѣ, а на оси ординатъ—критическія точки (температуры остановокъ). Въ результатѣ построенія получится кривая Guthrie, данная имъ въ 1876 году.<sup>1)</sup> Она имѣетъ видъ изображенный на фигурѣ № 17.

Точка А принадлежитъ раствору съ нулевымъ содержаніемъ соли, т. е. чистой водѣ, и совпадаетъ поэтому съ  $0^{\circ}$ . Другой точки остановки здѣсь нѣтъ.

Охлажденіе 10% раствора на этой диаграммѣ идетъ по вертикальной линіи ВВ, при чемъ точки В и Б отмѣчаютъ пункты остановокъ.

Выше температуры В весь растворъ оставался жидкимъ. Ниже Б—онъ весь находится уже въ твердомъ состояніи. Въ какой нибудь промежуточной точкѣ *в* часть раствора находится въ жидкомъ видѣ, тогда какъ другая часть уже отвердѣла.



Фиг. 16.

<sup>1)</sup> Евангуловъ и Вологдинъ. Металлографія. Петербургъ 1905 г.

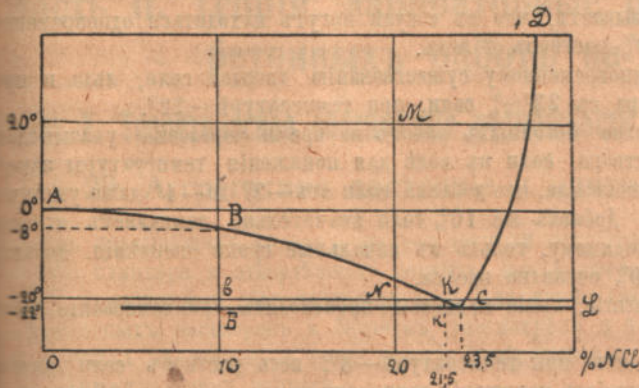
Разсмотрим оставшуюся при температурѣ  $\alpha$  жидкую часть 10% раствора.

Эта часть выше температуры  $\alpha$  всегда находится въ жидкомъ видѣ. При дальнѣйшемъ охлажденіи этой части, начиная съ этой температуры изъ нея станутъ выдѣляться некоторые составныя части въ твердомъ видѣ.

Разсмотримъ дальше растворъ съ 21,5% соли. Для этого раствора выше точки  $B$  возможно только жидкое состояніе; ниже точки  $B$  начинается выдѣленіе некоторыхъ составныхъ частей въ твердомъ видѣ. Изъ диаграммы видно, что точка  $B$  представляетъ

ту же температуру, что и точка  $\alpha$ . Отсюда слѣдуетъ, что 21,5%-ный растворъ есть то же самое вещество, какъ и оставшаяся жидкою при температурѣ  $\alpha$  часть 10% раствора.

Такимъ образомъ мы приходимъ къ заключенію, что 10% растворъ, при охлажденіи отъ точки  $B$  до  $\alpha$ , отчасти замерзъ, а оставшаяся жидкая часть сдѣлалась болѣе концентрированной — стала содержать уже 21,5% соли въ растворѣ. Поэтому мы должны допустить, что замерзла главнымъ образомъ вода. Дѣйствительно, извлекая непосредственно отвердѣвшія частицы, легко убѣдиться что это не что иное, какъ кусочки льда. Итакъ приходимъ къ заключенію, что кривая  $ABC$  соответствуетъ выпаденію изъ раствора льда.



Фиг. 17.

Если бы былъ взятъ растворъ правѣ точки  $C$ , т. е. съ большимъ содержаніемъ соли, чѣмъ 23,5%, то совершенно аналогичными разсужденіями можно убѣдиться въ томъ, что жидкость, по мѣрѣ охлажденія, содержитъ въ растворѣ все меньше и меньше соли, а въ данномъ случаѣ выпадаетъ изъ раствора въ твердомъ видѣ соль; слѣдовательно кривая  $CD$  соотвѣствуетъ кристаллизаци соли.

Итакъ, изъ всего вышесказаннаго слѣдуетъ, что если растворъ содержитъ соли меньше 23,5%, то при охлажденіи замерзаетъ вода, а жидкость постепенно обогащается солью; если же взять растворъ съ содержаніемъ соли больше 23,5%, то выкристаллизуются соль, а жидкость обдѣнетъ солью.

Посмотримъ, что должно произойти съ растворомъ въ 23,5% соли. Очевидно въ немъ ни другая часть не можетъ замерзнуть одна раньше другой: обѣ должны замерзнуть одновременно. Но при этомъ жидкость не мѣняетъ своей крѣпости, слѣдовательно температура во все время замерзанія остается неизмѣнной, т. е. въ данномъ случаѣ имѣемъ только одну критическую точку (точку остановки), что и подтверждается диаграммой.

Какъ показали изслѣдованія Offer'a и впоследствии Ponsot, отвердѣвшій растворъ съ содержаніемъ 23 1/2% соли не представляетъ однородной массы, а состоитъ изъ смѣси кристалликовъ льда и соли.

Разсматривая растворы съ содержаніемъ соли, отличнымъ отъ 23,5%, мы замѣчаемъ, что въ нихъ отвердѣваетъ или соль или вода, смотря по составу, пока оставшаяся жидкость не приблизится къ этой пропорціи, и тогда такая жидкость должна замерзнуть при постоянной температурѣ въ  $(-22^\circ)$ . Итакъ мы приходимъ къ заключенію, что критическая точка (точка остановки) — есть точка постоянная для всѣхъ растворовъ, что и подтверждается диаграммой Guthrie.

Каждой точкѣ плоскости диаграммы соответствуетъ растворъ опредѣленнаго состава и опредѣленной температурѣ. Область выше  $ACD$  принадлежитъ жидкимъ раство-

рамъ. Въ области *ACB* находятся смѣси изъ льда и жидкаго раствора соли. Въ области *DCL*—твердая соль и жидкій растворъ. Наконецъ, ниже прямой *BL* отвердѣвшій  $23\frac{1}{2}\%$  растворъ вмѣстѣ со льдомъ или солью, смотря по тому лѣвѣе или правѣе точки *C* мы находимся.

Всякія пограничныя точки между областями, т. е. точки кривыхъ характеризуютъ такое состояніе веществъ, при которомъ возможно одновременное равновѣсное существованіе жидкаго раствора, консистенціи опредѣляемой абсциссой точки, и твердаго вещества, находящагося въ избыткѣ.

Напримѣръ, точка *B* показываетъ, что въ сосудѣ могутъ находиться одновременно при температурѣ  $-8^{\circ}$  жидкій  $10\%$  растворъ и ледь.

Точка *B* соотвѣтствуетъ одновременному существованію твердой соли, льда и предѣльнаго состава жидкаго раствора съ  $23\frac{1}{2}\%$  соли, при температурѣ  $-22^{\circ}$ .

Выше въ главѣ «производство бетонныхъ работъ во время морозовъ» указывалось на примѣненіе на практикѣ раствора соли въ водѣ для пониженія температуры замерзанія воды. Ни чѣмъ практика показала, что добавка соли отъ  $-2^{\circ}$  до  $-4^{\circ}$  даже увеличиваетъ немного крѣпость бетона. Добавка же  $10\%$  соли значительно замедляетъ схватываніе и понижаетъ крѣпость, повидимому, только въ начальные сроки тверднѣнія. Добавка соли въ количествѣ большемъ  $10\%$  очевидно вредна.

Разсмотримъ по кривой *Guthrie*, какіе процессы происходятъ при замерзаніи воды съ  $10\%$  соли.

Начало замерзанія происходитъ при температурѣ  $-8^{\circ}$ ; весь растворъ соли замерзаетъ при температурѣ  $-22^{\circ}$ . Въ періодъ пониженія температуры отъ  $-8^{\circ}$  до  $-22^{\circ}$ , по мѣрѣ вычерзанія воды, растворъ будетъ все болѣе и болѣе концентрироваться отъ  $10\%$  до  $23\frac{1}{2}\%$ . Можно предположить, что съ концентраціей раствора замедленіе схватыванія и уменьшеніе прочности бетона будетъ расти, слѣдовательно, въ тѣхъ слояхъ внутри бетоннаго массива, которые будутъ схватываться при температурахъ ниже  $-8^{\circ}$  и дальше, прочность бетона будетъ уменьшаться. То же можно сказать и о всѣхъ другихъ примѣсяхъ. Отсюда мы приходимъ къ выводу, что примѣненіе различныхъ примѣсей для пониженія температуры замерзанія воды слѣдуетъ признавать вреднымъ и, какъ мы покажемъ въ дальнѣйшемъ, ненужнымъ.

## Часть II. Теорія, лабораторные опыты и практика бетонных работ на морозѣ.

### ГЛАВА X. Теоретическое обоснованіе возможности производства работъ зимой.

#### § 29. Агрегатное состояніе и критическія точки воды.

Въ предыдущихъ главахъ мы рассмотрѣли петрографическое строеніе портландъ-цементнаго клинкера и отвердѣваго цемента, теорію твердѣнія портландъ-цементныхъ растворовъ и различныя обстоятельства, такъ или иначе вліяющіе на схватываніе и твердѣніе цементныхъ растворовъ и бетоновъ, рассмотрѣли и установившіеся приемы и способы при работахъ въ морозы и теоретическія соображенія и мнѣнія, а также экспериментальныя данныя по этому вопросу.

Перейдемъ дальше къ логическому обоснованію возможности производства бетонныхъ работъ въ морозы и приведемъ произведенныя нами въ этомъ отношеніи опыты въ лабораторіи и на практикѣ.

Элементы, входящіе въ составъ бетона, въ общемъ случаѣ суть слѣдующіе:

- |   |   |              |
|---|---|--------------|
| 1) цементъ                                | } | твердыя тѣла |
| 2) песокъ                                 |   |              |
| 3) щебень                                 |   |              |
| 4) вода — въ обыкнов. условіяхъ жидкость. |   |              |

Разсмотримъ отношеніе ихъ къ измѣненію температуры окружающей среды.

Будемъ считать, что измѣненіе наружной температуры лѣтомъ и зимой колеблется въ предѣлахъ отъ  $+ 50^{\circ}$  С. до  $- 50^{\circ}$  С. Мы рассмотримъ въ предѣлахъ отъ  $+ 100^{\circ}$  до  $- 50^{\circ}$  С.

Цементъ—продуктъ обжига въ горнѣ обжигательной печи, сформовавшійся при температурѣ въ среднемъ  $1500^{\circ}$ . Поэтому измѣненіе температуры отъ  $+ 100^{\circ}$  до  $- 50^{\circ}$  на цементъ-порошокъ никакого вліянія оказать не можетъ.

Таково же отношеніе къ измѣненію температуры въ тѣхъ же предѣлахъ и другихъ двухъ элементовъ: песка и щебня. Итакъ эти три элемента въ предѣлахъ температуръ отъ  $+ 100^{\circ}$  до  $- 50^{\circ}$  С. не претерпѣваютъ никакихъ такихъ измѣненій, при которыхъ агрегатное состояніе ихъ вещества мѣнялось бы.

Не то происходитъ съ четвертымъ элементомъ бетона—водой.

Въ предѣлахъ температуръ отъ  $+ 100^{\circ}$  до  $- 50^{\circ}$  С. вода претерпѣваетъ слѣдующія физическія измѣненія.

#### В о д а

← — 50° и болѣе	0°	—	100°	100° и болѣе →
Кристаллическое твердое тѣло (ледь)	Критич. точка	Жидкость (вода)	Критич. точка	Газъ (парь)

Такимъ образомъ, въ предѣлахъ указанныхъ выше температуръ, вода фигурируетъ въ трехъ состояніяхъ: твердомъ, жидкомъ и газообразномъ.

Переходъ изъ одного состоянія въ другое характеризуется критическими точками. Такихъ точекъ двѣ—первая при  $0^{\circ}$ , характеризующая переходъ изъ твердаго состоянія (ледъ) въ жидкое (вода), и вторая—при  $100^{\circ}$ , характеризующая переходъ изъ жидкаго состоянія (вода) въ газъ (парь).

Въ обыкновенныхъ условіяхъ производства работъ существуетъ только первая критическая точка— $0^{\circ}$ , граница положительныхъ и отрицательныхъ температуръ. Вторая критическая точка— $100^{\circ}$  въ обыкновенныхъ условіяхъ быть не можетъ; она можетъ встрѣтиться въ исключительныхъ случаяхъ (какъ то, ремонтъ дымовыхъ фабричныхъ трубъ во время производства). Поэтому въ дальнѣйшемъ насъ будетъ интересоватъ только первая критическая точка— $0^{\circ}$ .

Элементы, входящіе въ составъ бетона, дѣлятся на двѣ группы: 1) на инертныя (недѣятельныя) каменные матеріалы—песокъ и щебень и 2) вещества дѣятельныя—цементирующія, въ данномъ случаѣ—цементъ. Въ эту группу нужно отнести и воду, безъ которой невозможно схватываніе цемента, такъ какъ она играетъ роль, какъ бы, возбудителя.

Какъ возбудитель, вода дѣйствуетъ на минераль цементъ ал и т. д. Для успѣшнаго дѣйствія необходимо, чтобы вода со всѣхъ сторонъ облекала зерна цемента. А это обстоятельство выполнимо при условіи, что вода находится въ жидкомъ состояніи, т. е. когда частицы ея обладаютъ способностью беспрепятственно скользить одна по другой. Отсюда слѣдуетъ, что твердое состояніе воды (ледъ) для данного условія не пригодно. Активность воды какъ возбудителя реакціи, несомнѣнно, мы полагаемъ, падаетъ при критическихъ точкахъ ( $0^{\circ}$  и  $100^{\circ}$ ), такъ какъ въ это время происходитъ физическое измѣненіе съ выдѣленіемъ (при переходѣ въ твердое состояніе) или поглощеніемъ (при переходѣ въ газообразное состояніе) тепла, которое расходуется на внутреннюю и внѣшнюю работу. Можно образно сказать, что при критическихъ точкахъ вода находится въ неустойчивомъ равновѣсіи.

Высказанное предположеніе подтверждается и опытами: при охлажденіи воды химическіе процессы схватыванія сильно замедляются, а при замерзаніи ея и совсѣмъ пріостанавливаются. Въ главѣ VIII указывалось, что, по опытамъ проф. Тетмаера, цементный растворъ (1:3) при температурѣ  $+18^{\circ}$  С. началъ схватываться черезъ 2,6 часа, закончилъ черезъ 8,5 часовъ. При температурѣ же замерзанія тотъ же растворъ началъ схватываться черезъ 21 часъ послѣ затворенія, а конецъ схватыванія наступилъ черезъ 38 часовъ.

Изъ опытовъ Гермера видно, что вліяніе мороза на цементный растворъ (бетонъ) тѣмъ сильнѣе, чѣмъ меньше образецъ предварительно твердѣлъ при температурѣ выше нуля, при чемъ пониженіе прочности доходило до 50%. Въ опытахъ проф. Бѣлелюбскаго восьмерки состава 1:3, дававшія черезъ 7 дней напряженіе на разрывъ отъ 29 до 35 кил. на кв. сантим., подъ вліяніемъ мороза понизили напряженіе отъ 4 до 5 кил. на кв. сантим.

Вліяніе пониженія температуры воды, взятой для раствора, на скорость схватыванія послѣдняго, по нашему мнѣнію, можетъ быть объяснено такимъ образомъ. Какъ раньше указывалось, химическія реакціи, происходящія при схватываніи и тверднѣи цементныхъ растворовъ, экзотермическія, т. е. сопровождающіяся выдѣленіемъ теплоты. Выдѣляющаяся теплота поглощается еще не вступившей въ реакцію водой. Температура воды вслѣдствіе ея большой теплоемкости, почти не повышается, а температура реакціи понижается. Последнее обстоятельство и замедляетъ самую реакцію.

Разсмотримъ, какіе процессы происходятъ въ водѣ при переходѣ ея изъ твердаго состоянія въ жидкое и наоборотъ.

Предполагаютъ, что связь между частицами тѣлъ зависитъ отъ ихъ взаимнаго притяженія. Это притяженіе называютъ сдѣленіемъ. Подъ вліяніемъ сдѣленія частицы сдвинулись бы до взаимнаго соприкосновенія, но этого не бываетъ. Слѣдовательно въ тѣлѣ, есть еще какая то сила, препятствующая силѣ сдѣленія. Предполагаютъ, что эта сила—теплота. Всякое тѣло, при любой температурѣ, обладаетъ нѣкоторымъ запасомъ тепловой энергіи въ видѣ движенія частицъ. Это движеніе и удерживаетъ частицы на и

вѣстномъ разстояніи одну отъ другой. Въ твердыхъ тѣлахъ тепловое движеніе сравнительно слабо и недостаточно для того, чтобы преодолѣть взаимное притяженіе двухъ со- сѣднихъ частицъ. Эти послѣднія двигаются въ опредѣленныхъ условіяхъ равновѣсія, ко- торое можетъ быть нарушено только посторонней силой.<sup>1)</sup> Такимъ образомъ и въ твер-дыхъ тѣлахъ частицы находятся въ состояніи весьма быстрого и сложнаго движенія, но при этомъ каждая частица не удаляется изъ нѣкоторой малой части пространства, рас-положенной вокругъ ея среднего положенія<sup>(2)</sup>. И если въ нѣкоторыхъ исключительныхъ случаяхъ бываетъ замѣтно перемѣщеніе частицъ, то это происходитъ подъ вліяніемъ вѣшнихъ причинъ и влечетъ за собою измѣненіе физическихъ свойствъ тѣла, напримѣръ волокнистое строеніе желѣза, подъ вліяніемъ ритмическихъ колебаній, переходитъ въ зер-нистое и т. д.

Въ жидкостяхъ частица преодолеваетъ притяженіе двухъ сосѣднихъ частицъ, но не можетъ преодолѣть притяженіе всѣхъ остальныхъ. Поэтому частицы обладаютъ возмож-ностью удалиться отъ сосѣднихъ, оставаясь въ ихъ средѣ, то есть могутъ двигаться, скользя одна по другой и слѣдовательно не сохраняютъ постояннаго равновѣсія, какъ то было въ твердыхъ тѣлахъ. Явленія диффузіи подтверждаютъ это свойство частицъ жидкости.

Предполагаютъ, что молекула жидкости построена гораздо сложнѣе молекулы ея же пара. По всей вѣроятности молекулы жидкости состоятъ изъ нѣсколькихъ, а можетъ быть и изъ большого числа простыхъ молекулъ.

Водяной паръ состоитъ изъ молекулы  $H_2O$ . Составъ молекулы воды предполагаютъ въ видѣ  $(H_2O)_n$ , гдѣ  $n$ —неизвѣстное число молекулъ пара. Roentgen (1892) первый высказалъ мысль, что молекулы воды и льда имѣютъ различное строеніе и что, при охлажденіи воды, въ ней начинаютъ образовываться молекулы льда. Поэтому холодная вода представляетъ изъ себя растворъ льда въ водѣ.

Далѣе въ 1899 году J. Van Laar доказалъ, что образованіе молекулъ  $(H, O)_2$  изъ  $H_2O + H_2O$  имѣетъ характеръ химической реакціи, что сопряжено съ весьма значительнымъ измѣненіемъ объема. Такъ, если бы, напр., 18 граммовъ  $H_2O$  цѣлкомъ перешло въ  $(H_2O)_2$ , то объемъ увеличился бы на 8,44 куб. см. Съ повышеніемъ температуры уменьшается число сложныхъ молекулъ, а это обстоятельство должно вызы-вать уменьшеніе объема, что дѣйствительно и наблюдается для воды между  $0^\circ$  и  $4^\circ$ . Sutherland въ 1900 году высказалъ мысль, что водяной паръ состоитъ изъ молекулъ тригидрола (HydroI— $H_2O$ ), а ледъ изъ молекулъ тригидрола ( $H_2O$ )<sub>3</sub>; вода же есть смѣсь тригидрола и дигидрола ( $H_2O$ )<sub>2</sub>... Плавленіе льда и нагреваніе воды сопровож-даются диссоціаціей тригидрола, испареніе воды—диссоціаціей дигидрола и тригидрола.

Dislaux въ 1912 году высказалъ предположеніе, что молекула льда имѣетъ строе-ніе  $(H_2, O)_2$ .

При переходѣ изъ твердаго состоянія въ жидкое, вода уменьшается въ объемѣ, и поглощаетъ 79,25 единицъ тепла. Это тепло дѣлается скрытымъ, т. е. уходитъ на ра-боту переведенія воды изъ твердаго состоянія въ жидкое.

Необходимыя 79,25 единицъ теплоты заимствуются извнѣ и, какъ мы видѣли на рисункѣ (фиг. 15), термометръ во все время процесса перехода стоитъ на нулѣ.

При нагреваніи жидкости теплота уходитъ на слѣдующую работу.

Одна часть притекающей теплоты тратится на повышеніе ея температуры, т. е. на увеличеніе кинетической энергіи движенія, какъ цѣлыхъ молекулъ, такъ и ихъ частей. Вторая, вообще малая часть тепла, тратится на вѣшнюю работу расширенія жидкости.

Третья часть тепла идетъ на внутреннюю работу, которая, въ самомъ общемъ слу-чаѣ, разбивается на три части: на работу разъединенія молекулъ жидкости одна отъ друга, на работу разъединенія составныхъ частей сложныхъ молекулъ жидкости, и, наконецъ, на работу перемѣщенія атомовъ. По упомянутой выше теоріи Sutherland'a можно думать, что, при плавленіи льда, при нагреваніи и при испареніи воды, часть

<sup>1)</sup> Сutherlandъ. Начальный курсъ химіи. С-Петербургъ. 1904 г. Стр. 17.

<sup>2)</sup> Сutherlandъ. Курсъ физики. С-Петербургъ, 1914 г. Томъ I стр. 584.

притекающей теплоты расходуется на диссоціацію дигидрола и тригидрола. <sup>1)</sup> При переходѣ воды въ твердое состояніе (ледь) наблюдается выдѣленіе тѣх же 79,25 единицъ тепла. При этомъ при 0° 100 объемовъ воды даютъ 108,3 <sup>2)</sup> объемовъ льда, т. е. 8,3%.

Вода, поглотивъ при переходѣ въ жидкое состояніе тепло, заключаетъ его въ скрытомъ состояніи, въ видѣ химической энергіи, поэтому легче вступаетъ въ реакцію. Наоборотъ, твердыя частицы воды (ледь) лишены этой химической энергіи — онѣ болѣе инертны.

При самомъ же процесѣ перехода изъ жидкаго состоянія въ твердое, при температурѣ 0°, вода, какъ указывалось выше, претерпѣваетъ катастрофическое измѣненіе съ перестроеніемъ молекулы и поэтому, мы полагаемъ, въ реакцію вступаетъ неэнергично, а можетъ быть и совсѣмъ не вступаетъ.

Въ самомъ тѣлѣ при 0° происходятъ, повидимому, слѣдующіе процессы. Капли воды (жидкія) затвердѣваютъ, отдавая заключающуюся въ нихъ энергію въ видѣ теплоты наружу, сосѣднія частицы (капли), уже ранѣ превратившіяся въ твердое тѣло—ледь, подъ вліяніемъ мѣстнаго притока теплоты, начинаютъ таять, поглощая полученное тепло. Такимъ образомъ происходитъ поперебѣнное измѣненіе состоянія тѣла — то жидкое, то твердое. Въ связи съ этимъ въ той же послѣдовательности будутъ происходить и измѣненія объема капли. Эти соображенія, какъ увидимъ ниже, играютъ весьма важную и рѣшающую роль при схватываніи цементнаго раствора.

### § 30. Экзотермичность реакціи твердѣнія цементнаго раствора.

Перейдемъ къ цементнымъ растворамъ. При соединеніи цементнаго порошка съ водой происходитъ схватываніе — реакція химическая — т. е. входяція въ реакцію тѣла теряютъ свои физическія свойства, и, въ результатѣ реакціи, получаютъ новыя тѣла съ совершенно новыми физическими свойствами.

Эта реакція — экзотермическая, т. е., не только не требующая для своего возникновенія притока тепла извнѣ, но наоборотъ выдѣляющая тепло. Какъ мы видѣли въ главѣ VII, количество этого тепла весьма значительно.

Какъ указывалось на страницѣ 17, началомъ схватыванія мы считаемъ тотъ моментъ, когда отдѣльныя частицы алита, раздѣленные другъ отъ друга массою воды, подъ вліяніемъ химическаго дѣйствія этой воды, разбухнутъ настолько, что въ состояніи будутъ другъ къ другу прилипать и засыпать въ одну общую массу. Концу схватыванія мы дали такое абсолютное опредѣленіе: концомъ схватыванія будетъ моментъ, когда вся вода въ цементномъ тѣстѣ, въ количествѣ эквивалентномъ, и исчезнетъ, войдя химически въ новообразованія цементнаго раствора.

Какъ указывалось на страницѣ 17-ой, здѣсь рѣчь идетъ о водѣ, необходимой для химическаго процесса, въ результатѣ котораго образуется твердое тѣло. Въ § 13 мы привели отношеніе воды въ твердѣющемъ цементномъ растворѣ, тамъ было указано, что вода въ отвердѣвшемъ растворѣ (бетонѣ) находится въ двухъ видахъ: вода гигроскопическая—свободная (влага) и вода химически связанная (гидратная). Въ данномъ случаѣ насъ интересуетъ только вода гидратная.

### § 31. Кривая твердѣнія цементнаго раствора (и бетона).

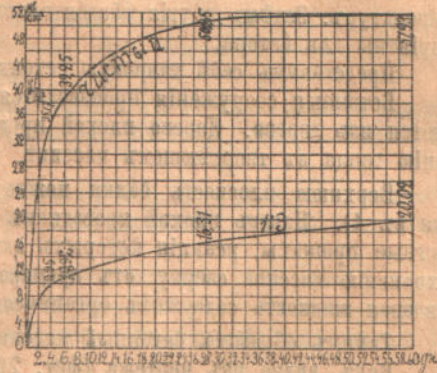
Если приготовить образцы (восьмерки или кубики) изъ порландъ-цемента и воды и изъ порландъ-цемента, песку и воды и вести непрерывное наблюденіе за увеличеніемъ ихъ прочности (отвердѣваніемъ), то увидимъ, что пріобрѣтеніе прочности сначала увеличивается довольно сильно, потомъ постепенно замедляется, все уменьшаясь и уменьшаясь, но не приостанавливаясь.

Какъ указывалось на страницѣ 18, Диккергофъ нашелъ къ концу 5 года прираще-

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики. Петербургъ 1914. Томъ I. Стр. 462.

<sup>2)</sup> Потылицынъ. Начальный курсъ химіи. Петербургъ. 1904.

на сопротивленія разрыву до 9,2%, а Тернебомъ нашелъ въ 20 лѣтнемъ образцѣ еще неразложившіяся зерна алита. Откладывая на оси ординатъ прочность образцовъ а на оси абсциссъ время, построимъ диаграмму увеличенія прочности твердѣющихъ цементныхъ образцовъ. На основаніи имѣющихся въ литературѣ<sup>1)</sup> данныхъ построена диаграмма фиг. 18. Данныхъ для построенія точекъ диаграммы въ первые 4 дня тверднія не приведено.



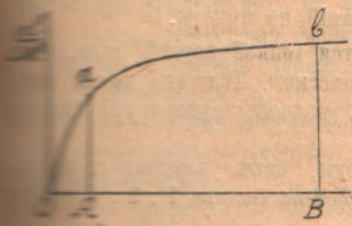
Фиг. № 18.

Итакъ кривая всего процесса окаменѣнія цементнаго раствора—схватыванія и тверднѣнія—имѣетъ видъ, приведенный на фигурѣ 19. Предположимъ, что въ какой нибудь точкѣ а заканчивается процессъ схватыванія и начинается процессъ тверднѣнія. Слѣдовательно въ первое время *OA* происходитъ процессъ схватыванія, во время котораго определенное количество воды, эквивалентное данному количеству цемента, переходитъ въ химически связанное состояніе. Этотъ переходъ характеризуется тѣмъ, что вода теряетъ свои физическія свойства, въ томъ числѣ и способность замерзать при 0°.

Такимъ образомъ на участкѣ кривой *Oa* за время *OA* происходитъ окаменѣніе цементнаго раствора, происходитъ образованіе новаго тѣла съ новыми физическими свойствами. Процессъ новообразованія въ точкѣ *a* заканчивается. Далѣе на участкѣ кривой *ab* этотъ новообразовавшійся камень продолжаетъ накапливать все большую и большую прочность.

### § 32. Тверднѣніе бетоннаго массива на морозѣ.

Если приготовить цементный растворъ изъ матеріаловъ, имѣющихъ температуру выше нуля и въ средѣ съ температурой тоже выше нуля (напримѣръ въ помѣщеніи съ температурой 14°, 15° С) и помѣстить этотъ растворъ въ среду съ температурой ниже нуля (выставить на морозѣ), то въ цементномъ растворѣ будутъ наблюдаться слѣдующія явленія:



Фиг. 19.

- 1) Температура тѣста будетъ постепенно понижаться.
- 2) Будетъ происходить схватываніе раствора, при чемъ эта реакція будетъ постепенно замедляться. Въ зависимости отъ запаса тепла въ растворѣ, реакція схватыванія или закончится, если кривая дойдетъ до точки *a* (фиг. № 19) или пріостановится совершенно съ тѣмъ, чтобы опять продолжаться, когда температура раствора, подъ вліяніемъ вышнихъ условій, поднимется выше нуля.

Правильнымъ образомъ для того, чтобы избѣжать вреднаго вліянія мороза, нужно дать раствору необходимый запасъ тепла въ такомъ количествѣ, чтобы его было достаточно на время *OA* (см. фиг. 19), чтобы происходить процессъ схватыванія. Какъ указывалось раньше, за это время выделяется теплотой, выделяющейся при экзотермической реакціи схватыванія.



Чѣмъ ниже температура окружающей среды (чѣмъ больше морозъ), тѣмъ большій запасъ тепла долженъ имѣть въ себѣ твердѣющей цементный растворъ.

Бетонъ, по самому способу производства работъ, предохраняется отъ вліянія низкихъ температуръ. Затѣмъ другія обстоятельства, сопровождающія твердѣніе бетона, также благоприятны для бетона.

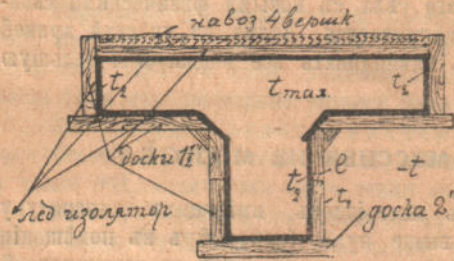
Представимъ себѣ тавровую бетонную балку, твердѣющую на морозѣ.

Бетонныя сооружеія производятся, какъ извѣстно, въ формахъ. Формы обычно дѣлаются изъ дерева. Дерево плохой проводникъ тепла, слѣдовательно, содѣйствуетъ удержанію тепла въ твердѣющемъ массивѣ.

Верхнюю плоскость балки можно прикрыть досками и сверху слоемъ навоза (вершка въ 4). Навозъ плохой проводникъ тепла. Кромѣ того въ навозѣ происходятъ гниlostные процессы, реакція которыхъ экзотермична. Это обстоятельство содѣйствуетъ предохраненію массива сверху отъ промерзанія. Навозъ долженъ быть сухимъ, такъ какъ навозная жидкость содержитъ органическія кислоты, вредныя для бетона.

Такимъ образомъ бетонный массивъ окутывается плохими проводниками тепла.

Какъ видно изъ чертежа (фиг. 20) наибольшая температура будетъ внутри бетоннаго массива — въ центрѣ фигуры. По мѣрѣ удаленія отъ этого центра въ разныя стороны, температура будетъ падать, достигая нѣкоторой минимальной величины  $t_2$  возлѣ досокъ формъ.



Фиг. № 20.

вслѣдствіе примѣси цемента. Правильно ли это предположеніе или неправильно — это существеннаго значенія для предмета настоящихъ изслѣдованій не имѣетъ.

Вся наружная поверхность бетоннаго массива покроется тонкой коркой льда. Эта корка герметически закроетъ со всѣхъ сторонъ бетонный массивъ. Толщина корки зависитъ отъ степени охлажденія бетоннаго массива, т. е. отъ разности температуръ массива и наружной среды и отъ коэффициента теплопроводности.

Коэффициентъ теплопроводности льда изъ чистой воды, какъ указывалось въ таблицѣ № 17 равенъ 2,06. Коэффициентъ теплопроводности бетона состава 1 : 2 : 4 равенъ 0,76—1,04.

Коэффициентъ теплопроводности корки можно предположить равнымъ коэффициенту бетона по слѣдующимъ соображеніямъ. Корка состоитъ изъ замерзшихъ частичекъ воды, пузырьковъ воздуха и массы бетона. Воды въ бетонѣ въ среднемъ 12%, слѣдовательно она существеннаго значенія на общій коэффициентъ теплопроводности оказать не можетъ. Такимъ образомъ корка не увеличиваетъ теплопроводности замерзшаго слоя и слѣдовательно сохраненію теплоты массивомъ не вредитъ. Но эта корка сильно препятствуетъ испаренію свободной воды изъ массива; а это обстоятельство весьма благотворно при схватываніи и твердѣніи бетона, такъ какъ не требуется поливка, которой обычно компенсируется испарившаяся вода при лѣтнихъ работахъ бетона. Въ виду плохой теплопроводности бетона толщина корки можетъ быть, повидимому, невелика. Какъ указывалось на страницѣ 49, толщина корки на открытыхъ поверхностяхъ бетона, не защищенныхъ опалубкой, не превосходитъ 3—5 мм.

Предположимъ, что температура наружной среды ( $-t$ ) настолько низка, что температура  $t_2$  опускается до нуля и что цементный растворъ въ мѣстахъ соприкосновенія съ досками формъ еще не схватился.

При этомъ условіи вода, не успѣвшая еще войти въ реакцію, начнетъ вымерзать изъ раствора, подобно тому, какъ вымерзаетъ она изъ раствора поваренной соли, какъ указывалось раньше (глава IX).

Можно предположить, что точка замерзанія воды лежитъ ниже нуля градусовъ,

слѣдовательно въ разсматриваемомъ случаѣ толщина будетъ меньше приведенныхъ данныхъ.

Тамъ же указывалось, что окончательная крѣпость растворовъ и бетоновъ портланд-цемента черезъ продолжительные сроки не уменьшается, если бетонъ замерзаетъ до наступленія начала схватыванія и затѣмъ, послѣ оттаиванія наступаютъ условія, благоприятныя для схватыванія цемента.

На страницѣ 61 указывалось, что вода, замерзающая въ пористыхъ матеріалахъ не разрушаетъ ихъ вслѣдствіе текучести льда. Поэтому нѣтъ основаній опасаться разрушенія (растрескиванія) корки при замерзаніи воды.

Все указанныя соображенія приводятъ къ заключенію, что устанавливаются условія, благоприятныя для теченія реакціи схватыванія цементнаго раствора, безотносительно будетъ ли корка, или ея не будетъ.

При химическихъ процессахъ твердѣнія портланд-цемента, какъ указывалось раньше, выделяется теплота, которая компенсируетъ потерю при охлажденіи отъ вліянія низкой температуры вѣшной среды.

При повышеніи наружной температуры (уменьшеніе мороза) уменьшается потеря теплоты на охлажденіе. Въ этомъ случаѣ избытокъ внутренней теплоты можетъ расходоваться на оттаиваніе льда корки съ внутренней стороны и на поднятіе температуры получившейся изо льда воды.

Освободившаяся вода возобновляетъ замершую реакцію, которая протекаетъ по кривой (см. черт. № 19), пока не достигнетъ точки *a*, за которой вода уже не доступна вліянію низкихъ температуръ.

Такимъ образомъ устанавливается слѣдующій ходъ твердѣнія бетоннаго массива зимой. Въ періоды низкихъ температуръ вѣшной среды (въ морозы) происходитъ отвердѣваніе внутреннихъ слоевъ массива, а наружныя могутъ даже промерзнуть. Въ періоды температуръ вѣшной среды выше  $0^{\circ}$  (оттепели, прогреваніе лучами солнца) происходитъ оттаиваніе промерзшей наружной корки массива, возобновляется замершая реакція схватыванія и происходитъ отвердѣваніе наружныхъ слоевъ. Опускается температура вѣшной среды ниже  $0^{\circ}$ , прекращается реакція... и мало по малу происходитъ отвердѣваніе наружныхъ слоевъ бетона: капля за каплей свободная вода переходитъ въ химически связанное состояніе, переходя за точку *a* діаграммы—предѣлъ досягаемости мороза.

Приведемъ изъ практики примѣръ, подтверждающей только что изложенныя соображенія. При постройкѣ нами желѣзобетоннаго путепровода черезъ пути Московско-Кіево-Воронежской желѣзной дороги у станціи Кіевъ III-й въ 1916—1917 г.г. верхняя неразрѣзная двухпролетная балка прямоугольнаго сѣченія  $115 \times 80$  см., лежащая на трехъ колоннахъ была сдѣлана въ морозъ. Черезъ нѣкоторый промежутокъ времени при морозѣ были сняты деревянные формы съ вертикальныхъ плоскостей балки. Въ солнечные дни, не смотря на средній морозъ ( $-5^{\circ}$  до  $-6^{\circ}$ ), на открытыхъ стѣнкахъ балки появились большія темныя пятна. По провѣркѣ пятна оказались мокрыми. Ежедневно пятна уменьшались и наконецъ совсѣмъ исчезли. Повидимому, какъ указывалось раньше, растаяла вода, возобновилась замершая реакція—и произошло схватываніе. Вредныхъ послѣдствій замѣчено не было.

При производствѣ бетонныхъ работъ на морозѣ приходится считаться съ весьма рѣзкими колебаніями температуры наружнаго воздуха. Весьма часто послѣ оттепели, когда температура наружнаго воздуха выше  $0^{\circ}$ , наступаетъ довольно сильный морозъ, который послѣ 1—2 дней, опять смѣняется оттепелью. Интереснымъ является вопросъ, въ какой мѣрѣ подчиняется этимъ колебаніямъ твердѣющей бетонный массивъ, т. е. въ какой мѣрѣ происходитъ охлажденіе и интенсивность колебаній температуры. Косвенное представленіе объ этомъ можно составить по числамъ, даннымъ Номен'омъ<sup>1)</sup>.

Въ гранитѣ, на глубинѣ 60 см., суточные колебанія температуры составляютъ въ

<sup>1)</sup> Журналъ Министерства Путей Сообщенія 1909 г., кн. II стр. 89. Инж. А. М. Ларионовъ „О дѣйстви мороза и атмосферныхъ вліяній на земляные откосы и ихъ укрѣпленіе.“  
Nomen. Der tägliche Wärmeumzatz im Boden. Leipzig. 1897 г.

среднем  $1,36^{\circ}$ , въ песокъ  $0,12^{\circ}$ , на болотистомъ дугу  $0,04^{\circ}$ . Чтобы пройти отъ поверхности до глубины 60 см., максимумъ температуры долженъ потратить времени: въ гранитъ 10 ч. 35 м., въ песокъ 19 ч. 43 м., въ болотистой почвѣ 38 ч. 2 м., а минимумъ— въ гранитъ 8 ч. 30 м., въ песокъ 16 ч. 40 м. и въ болотистой почвѣ 34 ч. 7 м. Промерзаемость матеріаловъ прямо пропорціональна ихъ теплопроводности. Какъ видно изъ таблицы № 17, теплопроводность бетона (0,70) занимаетъ положеніе между теплопроводностью песка (0,27) и теплопроводностью гранита ( $\sim 2$ ). Слѣдовательно вѣ время, необходимое для охлажденія бетона будетъ заключаться между цифрами, данными Нотенъ омъ для этихъ матеріаловъ, т. е. по интерполяціи получаемъ для бетона: при прежнихъ условіяхъ для максимумъ температуры 17 ч. 27 м., для минимумъ температуры 14 ч. 38 мин. Эти цифры должны быть еще увеличены въ виду вліянія досокъ формъ, такъ какъ теплопроводность досокъ равна 0,093.

Интересно выяснитъ, какую роль играетъ арматура въ твердѣніи на морозѣ бетонномъ массивѣ. Вслѣдствіе высокой теплопроводности желѣза, стержни арматуры, соединяя различныя части массива, передаютъ теплоту отъ внутреннихъ болѣ теплыхъ слоевъ бетона, къ наружнымъ—болѣ холоднымъ. Такимъ образомъ по стержнямъ арматуры теплота болѣ равномерно и въ болѣ короткое время распространяется по всему бетонному массиву.

### § 33. Ядро твердѣнія бетона.

Самая высокая температура  $t$  max въ рассматриваемой тавровой балкѣ (см. фиг. 20) будетъ въ центрѣ поперечнаго сѣченія. Съ повышеніемъ температуры, процессы окаменѣнія цементнаго раствора—схватываніе и твердѣніе—идутъ болѣ интенсивно. Слѣдовательно въ данномъ случаѣ образованіе искусственнаго камня-бетона и дальнейшее его окаменѣніе начинается въ центрѣ фигуры и распространяется отъ центра къ периферіи. Формованіе любого бетоннаго массива обычно ведется слоями снизу вверхъ. Въ центрѣ эта работа схватываніе можетъ начаться раньше въ слояхъ, уложенныхъ раньше, т. е. въ нижнихъ; въ верхнемъ слое, уложенномъ послѣднимъ, схватываніе начнется тоже раньше, чѣмъ во всѣхъ другихъ слояхъ. Отсюда какъ будто бы слѣдуетъ, что сдѣланіе этой заключеніе о зарожденіи искусственнаго камня въ центрѣ фигуры невѣрно. На самомъ дѣлѣ это не такъ. Рѣчь идетъ не о началѣ схватыванія и даже не объ одномъ началѣ схватыванія, а рассматривается весь процессъ—сумма причинъ окаменѣнія, происходящей въ періодъ довольно продолжительнаго времени.

Введемъ новый терминъ ядро твердѣнія.

Ядромъ твердѣнія мы будемъ называть тотъ слой въ сѣченіи бетоннаго массива въ которомъ первомъ начнется образованіе новаго искусственнаго камня-бетона.

Примѣняя этотъ терминъ къ рассматриваемому случаю, можно сказать, что при твердѣніи бетона на морозѣ ядро твердѣнія массива зарождается въ центрѣ его и распространяется къ периферіи.

### § 34. Твердѣніе бетоннаго массива въ водѣ.

Рассмотримъ твердѣніе бетоннаго массива въ водѣ. Вслѣдствіе большой теплоемкости воды, вліяніе измѣненія температуры наружнаго воздуха передается медленно, поэтому въ водѣ не можетъ быть такихъ рѣзкихъ колебаній температуры въ теченіе сутокъ, какія наблюдаются въ наружномъ воздухѣ. Массивъ, погруженный въ воду, будетъ имѣть температуру выше окружающей среды (воды). Поэтому направленіе потока тепловой энергіи будетъ отъ центра къ периферіи.

Теряемая, при отдачѣ наружными поверхностями, теплота компенсируется въ нѣкоторой степени теплотой, выделяющейся при химическихъ процессахъ твердѣнія бетоннаго массива.

Вслѣдствіе болѣ высокой температуры внутреннихъ слоевъ, ядро твердѣнія зарождается въ центрѣ массива и распространяется къ периферіи.

Испарения воды изъ массива быть не можетъ.

Разсмотримъ измѣненіе общаго количества воды въ бетонномъ массивѣ. Для этого воспользуемся данными проф. Наджи, приведенными въ таблицахъ № 4, № 5 и № 6 и представленными нами на диаграммахъ № 7, № 8 и № 9. Суммируя количество гигроскопической и гидратной воды для каждаго дня при твердѣніи на воздухѣ и въ водѣ, составляемъ таблицу № 24.

ТАБЛИЦА № 24.

Цементное тѣсто съ 20% воды.

Возрастъ образцовъ.	24 часа	2 недѣли	1 мѣс.	3 мѣс.	11 мѣс.	
Храненіе {	на воздухѣ . . .	14,75	13,60	13,69	11,79	9,59
	въ водѣ . . .	—	21,61	21,83	21,56	19,70

Цементное тѣсто съ 33% воды.

Возрастъ образцовъ.	5 дн.	13	35	72	128	187	
Храненіе {	на воздухѣ . . .	29,50	29,84	29,09	21,52	20,58	16,49
	въ водѣ . . .	37,90	37,77	37,22	35,30	35,45	37,13

Цементное тѣсто съ 50% воды.

Возрастъ образцовъ.	5 дн.	13	35	72	128	187	
Храненіе {	на воздухѣ . . .	48,77	44,14	40,66	27,77	26,07	19,36
	въ водѣ . . .	55,15	45,07	43,31	42,23	41,55	40,85

Для наглядности представимъ данныя таблицы въ видѣ диаграммы № 21.

Кривыя № 1, 2, 3 показываютъ общее количество воды при храненіи на воздухѣ кривыя I, II, III—при храненіи въ водѣ.

Положеніе кривыхъ позволяетъ сдѣлать слѣдующіе общіе выводы при твердѣніи въ водѣ.

1) Общее количество воды въ первые сроки твердѣнія увеличивается до нѣкотораго предѣла.

2) Затѣмъ это количество начинаетъ уменьшаться по мѣрѣ твердѣнія раствора.

3) Уменьшеніе воды происходитъ въ зависимости отъ количества, взятаго для тѣста. Чѣмъ больше воды было взято при затвореніи, тѣмъ больше потеря при твердѣніи.

4) Количество воды въ растворахъ нормальной густоты и болѣе густыхъ долгое время превышаетъ первоначальное.

5) Количество воды въ растворахъ жидкихъ съ избыткомъ воды быстро опускается ниже первоначальнаго, послѣ увеличенія въ первые дни твердѣнія; но затѣмъ процессъ потери воды замедляется. Количество гидратной воды въ твердѣющихъ въ водѣ растворахъ, какъ видно изъ диаграммъ № 7, № 8 и № 9, больше, чѣмъ въ твердѣющихъ на воздухѣ.

Приведенныя изслѣдованія растворовъ относятся также и къ бетонамъ. Но въ бетонахъ подъ вліяніемъ камневидныхъ: песка, гравія или щебня—предѣльныя измѣненія значительно меньше, чѣмъ для растворовъ изъ чистаго цемента.

Изложенныя выше обстоятельства даютъ возможность высказать нѣкоторыя причины расширенія бетона, твердѣющаго въ водѣ.

Бетонный массивъ, сдѣланный на воздухѣ, имѣетъ поры, заполняемыя воздухомъ.

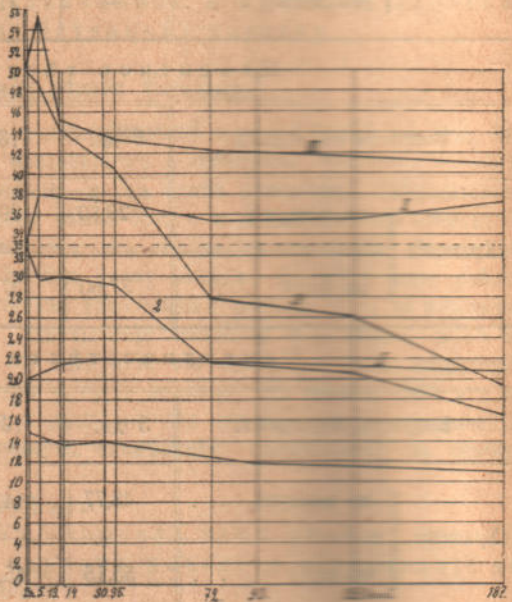
При погруженіи массива въ воду, открывается доступъ внутрь. Вода, проходя по капиллярамъ, вытѣсняетъ воздухъ, замѣщая его.

Можно предположить, что въ данномъ случаѣ играетъ не малую роль и гидростатическое давленіе. Повидимому вода проникаетъ и въ поры инертныхъ камневидныхъ, тѣмъ увеличивая и ихъ объемъ. Такимъ образомъ количество воды въ первые дни тверднія въ массивѣ увеличивается, что и подтверждается диаграммой (см. фиг. № 21).

По мѣрѣ хода химическихъ процессовъ тверднія, часть воды расходуется на реакцію (гидратная вода); увеличивающіяся молекулы, заполняя поры, вытѣсняютъ часть свободной (гигроскопической) воды. Въ результатѣ общее количество воды уменьшается. Такъ какъ химическіе процессы продолжаются долгое время, то и зависящій отъ нихъ процессъ уменьшенія воды продолжается также долгое время. Это обстоятельство и подтверждается диаграммой. Вода въ порахъ камневидныхъ остается и можетъ компенсировать, въ случаѣ надобности, недостатокъ ея въ растворѣ, окружающемъ щебенку. Возможно, что вода, вытѣсняемая изъ поръ увеличивающимися молекулами раствора, встрѣчаетъ на своемъ пути запертыя уже капилляры. Въ такомъ случаѣ частичное давленіе въ массивѣ увеличивается; подъ его вліяніемъ часть воды можетъ войти въ поры камневидныхъ, часть останется въ сжатомъ состояніи. Подъ вліяніемъ этихъ двухъ обстоятельствъ, объемъ массива тоже увеличится. Если эти соображенія вѣрны, то является вопросъ, куда расходуется эта запертая, находящаяся подъ давленіемъ вода. Какъ мы видѣли въ опытѣ Тернебома, въ цементномъ образцѣ, 20 лѣтъ твердѣвшемъ подъ водой, обнаружены неразложившіяся зерна алита. Подъ вліяніемъ давленія, которое съ теченіемъ времени должно увеличиваться, вода, мы полагаемъ, проникаетъ черезъ толщу коллоида, окружающаго зерна алита, и вступаетъ въ реакцію съ алитомъ, тѣмъ уплотняя массу бетона. Такой процессъ продолжается пока вся гигроскопическая вода не войдетъ въ реакцію, т. е. не перейдетъ въ гидратную. Можно предположить, что въ какомъ нибудь мѣстѣ этой воды недостаточно для разложенія зерна алита, тогда лишнее количество алита остается неразложившимъ и является до поры, до времени инертнымъ камневиднымъ. Въ дальнѣйшемъ происходитъ уже по малу кристаллизація коллоидной массы (см. стр. 12), окружающей зерна алита.

Въ подтвержденіе того обстоятельства, что не все количество цемента въ растворѣ разлагается, приведемъ слѣдующія данныя.

Инженеръ Джонсонъ<sup>1)</sup> обнаружилъ въ Engineering Record (отъ 2 Января 1916



Фиг. № 21.

<sup>1)</sup> Журналъ Министерства Путей Сообщенія 1916 года Кн. VII стр. 144. Микроскопія цемента.

года) результаты серии наблюдений, которые имъ были сдѣланы надъ бетономъ при помощи микроскопа.

Для опытовъ былъ взятъ образецъ бетона изъ стѣнки плотины гидроэлектрической станціи Корнелскаго Университета (Итака, въ штатѣ Нью-Йоркъ).

Инженеръ Джонсонъ при своихъ изслѣдованіяхъ установилъ слѣдующіе факты. Между составными частями бетона: гравіемъ и цементомъ и въ самомъ цементѣ замѣчены имъ подъ микроскопомъ большія пустоты. Пустоты эти показываютъ, что или перемѣшиваніе бетона было несовершенно, или же что при кладкѣ бетона его мало утрамбовывали.

Микроскопическія изслѣдованія обнаружили также, что въ общей массѣ бетона находится значительная часть цемента, доходящая до 75% — 80% его количества, не успѣвшая схватиться. Понятно, что несхватившійся цементъ является напрасной затратой матеріала.

На основаніи этихъ опытовъ инженеръ Джонсонъ приходитъ къ слѣдующему заключенію.

Сопротивленіе и плотность бетона зависятъ отъ сопротивленія и плотности его составныхъ частей. Изъ нихъ цементъ, какъ оказывается, мало используется вслѣдствіе несовершенства его схватыванія и образованія пустотъ. Такимъ образомъ въ составѣ бетона цементъ является матеріаломъ съ наименьшимъ сопротивленіемъ. Это указываетъ, что употребляющіеся нынѣ способы перемѣшиванія бетона являются несовершенными.

### § 35. Твердѣніе бетоннаго массива на воздухѣ при лѣтней температурѣ.

Разсмотримъ условія твердѣнія бетоннаго массива (фиг. 20) на воздухѣ при температурахъ, обычныхъ для бетонныхъ работъ. Формы для бетоннаго массива обычно деревянные. Верхняя плоскость массива обыкновенно покрывается слоемъ песку, или рогожами, мѣшками, брезентами и т. д., или просто ничѣмъ не покрывается, что гораздо хуже. Разность температуръ, максимальной—дня и минимальной—ночи, весьма значительна. Можно принять въ среднемъ максимальную температуру дня на прямыхъ лучахъ солнца 40°C, а минимальную ночи 10°C. Температуру бетоннаго массива можно принять среднюю изъ приведенныхъ  $\frac{1}{2}(40 + 10) = 25^\circ\text{C}$ . Подъ вліяніемъ экзотермичности реакцій окаменѣнія, эта температура будетъ стремиться къ повышенію.

Верхняя горизонтальная плоскость массива и часть боковой вертикальной, доступной прямымъ лучамъ солнца, будутъ прогрѣваться этими лучами болѣе сильно, чѣмъ части поверхности массива, закрытыя отъ лучей солнца. Передача тепловой энергіи или, выражаясь образно, потокъ тепловой энергіи устанавливается по направленію убывающихъ температуръ. Количество передающейя теплоты выражается закономъ

$$W = Q (t_1 - t_2)$$

т. е. пропорціонально разности температуръ поверхности тѣла и среды.

Слѣдовательно направленіе потока тепловой энергіи днемъ — будетъ отъ среды къ массиву, т. е. снаружи внутрь; причемъ, болѣе интенсивно въ мѣстахъ, доступныхъ прямымъ лучамъ солнца—пропорціонально  $(t_1 - t_2)$ , гдѣ  $t_1$  мы приняли равнымъ 40°C, а  $t_2$  можно принять равнымъ температурѣ массива 25°C; тогда разность  $t_1 - t_2 = 40 - 25 = 15^\circ$ . Если принять температуру среды въ тѣни 30°C, т. е. на 10° меньше, то разность  $(t_1 - t_2) = 30 - 25 = 5^\circ$ , т. е. на 10° меньше. Такимъ образомъ прогрѣваніе бетоннаго массива будетъ неравномѣрное.

Это обстоятельство отразится на интенсивности реакціи отвердѣнія цементнаго раствора (бетона).

Ночью наоборотъ температура бетоннаго массива будетъ выше температуры среды. Разность температуръ получится съ обратнымъ знакомъ  $t_2 - t_1 = 25 - 10 = 15^\circ$ . Слѣ-

довательно поток тепловой энергии устанавливается в обратном направлении, от массива к среде.

Такое попеременное то прогревание, то охлаждение массива смягчается благодаря плохой теплопроводности досок форм, так как передача теплоты от бетона к среде и обратно происходит через слой доски по закону

$$W = \lambda \frac{(t - t')}{e}$$

где:  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности дерева;

$e$  — толщина доски;

$t, t'$  — температуры наружной и внутренней поверхности доски.

Под влиянием более высокой наружной температуры будет происходить весьма интенсивно испарение свободной (гигроскопической) воды из тела массива, особенно его наружных поверхностей. Обычно применяемая поливка готового бетонного сооружения в первые сроки твердения имеет целью компенсировать эту потерю воды при испарении.

Поливка имеет несомненно колоссальное значение на прочность твердеющего бетона; но она имеет также и некоторые свои отрицательные стороны. Применяемая для поливки вода обычно холоднее поливаемой поверхности бетона. Поэтому происходит охлаждение наружных слоев бетона, что, мы полагаем, не может быть полезным для реакций твердения бетона. После поливки начинается усиленное испарение воды, а это обстоятельство еще более понижает температуру воды.

Механизм испарения, исходя из кинетической теории строения вещества, заключается в следующем: Частицы жидкости, принадлежащая ей поверхностному слою и имеющие в данный момент большую скорость, направленную вниз и вверх к этой поверхности, вылетают из нее. При этом вылетают те из частиц поверхностного слоя, которые имеют наибольшую скорость, а следовательно и наибольшую живую силу. Этот эффект, суммируясь, дает потерю живой силы, а следовательно и понижение температуры жидкости.

На боковых вертикальных поверхностях тоже происходит испарение воды из бетонного массива. Солнце и ветер сушат наружные поверхности досок форм. Эта потеря влаги компенсируется досками, вследствие их гигроскопичности, из прилегающих изнутри слоев бетона. В данном случае потеря влаги, правда незначительная, не компенсируется поливкой, так как вертикальные поверхности обычно не поливаются.

Итак, в нарушенных слоях бетона температура, вообще говоря, неравномерная. Влияние изменения температур дня и ночи, испарение, разность температур — воды при поливке и наружных поверхностей бетона, изменение направления теплового потока — все это создает условия, при которых нарушается равномерное течение реакции при схватывании и твердении бетона. При совокупности всех этих условий поверхностные слои бетона схватываются и отвердевают быстрее слоев внутренних. Следовательно при твердении бетона на воздух при обыкновенных условиях ядро твердения зарождается на периферии и распространяется в глубину массива к центру.

Разсмотрим, как изменяется общее количество воды при твердении на воздух.

Свеже приготовленный массив, твердеющий на воздух, с первых же моментов своего существования начинает терять воду вследствие испарения. Улетывающиеся при твердении молекулы цемента, постепенно заполняя поры, вытесняют воду и таким образом усиливают процесс потери воды. Этому обстоятельству благоприятствует также попеременное, то сжатие, то расширение под влиянием колебания температуры наружной среды (перемены дня и ночи). В этом, выражаясь образно, капиллярный массива принимают участие и инертные камневидные, подчиняясь общему закону усадки. Причем, чем больше воды было взято при затворении, тем больше ее потеряется от выше перечисленных причин. Все перечисленные соображения относятся к свободной

(гигроскопической) водѣ. Диаграммы (черт. № 7, № 8, № 9) наглядно подтверждаютъ потерю свободной воды. Кривыя № 1 рѣзко опускаются къ оси абсциссъ.

Перехода къ количеству гидратной воды, мы замѣтимъ слѣдующее.

Здѣсь отсутствуютъ причины для возникновенія давленія въ капиллярахъ: поры въ бетонѣ заполнены воздухомъ. Вода менѣе интенсивно проникаетъ сквозь желатинозную оболочку къ еще неравложившемуся ядру алита; поэтому общее количество вступающей въ реакцію воды меньше. Тѣ же диаграммы подтверждаютъ эти соображенія: кривыя 2, относящіяся къ количеству гидратной воды, всюду идутъ ниже кривыхъ II, изображающихъ количества гидратной воды при твердѣннн въ водѣ.

Между прочимъ изъ диаграммы фиг. № 21 видно, что, при твердѣннн цементнаго раствора (бетона) на воздухѣ, общее количество воды, независимо отъ того, сколько % воды взято въ началѣ, стремится къ нѣкоторой постоянной величинѣ. Можно убѣдиться, продолжая кривыя 1, 2, 3, что онѣ пересѣкаются приблизительно въ одной точкѣ, соответствующей  $10^{1\frac{0}{2}\%}$  воды. Этотъ результатъ близокъ къ указанному раньше опредѣленію количества воды въ отвердѣвшихъ цементныхъ растворахъ. На стр. 25 указывалось количество воды отъ  $11^{1\frac{0}{2}\%}$  до  $15\%$ .

## § 36. Сравненіе процессовъ твердѣннн бетона на морозѣ, въ водѣ и при лѣтней температурѣ на воздухѣ.

Сравнимъ разсмотрѣнныя выше обстоятельства, сопровождающія твердѣннн бетона на морозѣ и при лѣтней температурѣ въ водѣ и на воздухѣ, и сдѣлаемъ соответствующіе выводы.

### 1. Направленіе потока тепловой энергіи.

При твердѣннн бетоннаго массива на морозѣ и въ водѣ направленіе потока тепловой энергіи постоянное—отъ центра массива къ периферіи.

Происходитъ потеря теплоты массивомъ. Эта потеря компенсируется въ нѣкоторой степени дѣйствіемъ внутренняго источника теплоты. Такимъ образомъ оба процесса, суммируются алгебраически и стремятся къ поддержанію нѣкоторой постоянной температуры или (въ случаѣ большихъ морозовъ) къ пониженію ея, но не къ увеличенію. Причемъ процессъ пониженія температуры внутри массива, даже въ случаѣ рѣзкихъ измѣненнн наружной температуры (морозовъ), происходитъ плавно безъ рѣзкихъ скачковъ.

При твердѣннн бетоннаго массива при лѣтней температурѣ на воздухѣ направленіе потока тепловой энергіи переменное, въ зависимости отъ колебанія температуры дня и ночи. Когда температура среды выше температуры массива (въ теплые дни), направленіе потока—внутри массива. Благодаря этому получается притокъ теплоты, который воспринимается наружными слоями массива и медленно передается внутрь массива, вслѣдствіе малой теплопроводности бетона. Дѣйствіе внутренняго источника теплоты суммируется арифметически съ этимъ вліяніемъ внѣшней температуры; въ результатъ чего получается подъемъ температуры массива, достигающей максимальнаго значенія на наружныхъ слояхъ массива.

При пониженнн температуры внѣшней среды (въ холодныя ночи), потокъ тепловой энергіи мѣняетъ направленіе; происходитъ отдача теплоты массивомъ, то есть такой же процессъ, какъ при твердѣннн на морозѣ.

Потеря и поглощеніе теплоты тѣломъ пропорціональны разности температуръ поверхности тѣла и среды.

Для уясненія колебанія температуры дня и ночи, приведемъ данныя метеорологическихкихъ наблюденнн Киевскаго Политехническаго Института за лѣтніе мѣсяцы — июль и августъ 1916 года. Наблюденія производились три раза въ день: 7 ч. утра, 1 ч. дня и 9 ч. вечера.

Кромѣ этого, по термометру —максимумъ и термометру —минимумъ, наблюдались максимальныя и минимальныя температуры въ теченіе сутокъ.



ТАБЛИЦА № 25.

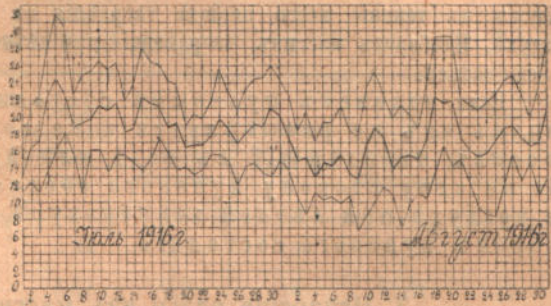
Мѣсяць Іюнь 1916 г.							Мѣсяць Августъ 1916 г.						
Число	Температура воздуха.			Град. С.			Число	Температура воздуха.			Град. С.		
По ново- му стилю	7 час. утра	1 часть дня	9 час. вечера	Средняя	Макси- мумъ	Мини- мумъ	По ново- му стилю	7 час. утра	1 часть дня	9 час. вечера	Средняя	Макси- мумъ	Мини- мумъ
1	11,4	13,7	13,4	12,8	14,4	11,1	1	16,6	21,3	13,9	17,3	22,6	13,8
2	13,2	20,0	15,6	16,3	21,3	12,3	2	12,6	17,4	14,6	14,9	18,3	10,6
3	14,8	20,6	16,3	17,2	22,3	11,1	3	13,2	18,8	13,3	15,1	20,6	8,4
4	19,7	26,1	20,9	22,2	27,9	13,6	4	12,6	12,8	13,1	12,8	17,0	11,1
5	19,5	29,8	24,2	24,5	31,9	16,1	5	12,4	17,6	14,1	14,7	19,3	10,1
6	19,8	29,5	18,3	22,5	30,4	18,1	6	12,2	17,3	13,2	14,2	19,2	10,7
7	17,6	21,8	16,8	18,7	22,4	15,5	7	12,5	20	14,2	15,6	21,2	9,8
8	16,5	24,0	17,5	19,3	24,9	11,0	8	11,8	16,3	11,6	13,2	18,3	10,8
9	18,2	22,2	18,7	19,7	25,2	16,1	9	9,3	16,3	12,8	12,8	17,6	6,6
10	18,2	25,8	20	21,3	26,4	16,1	10	13,4	22,7	14,8	16,9	23,4	8,6
11	18,9	24,7	18,9	20,8	25,5	13,4	11	15,1	24,2	17,1	18,8	25,2	10,1
12	20,3	25,8	18,6	21,6	26,3	15,5	12	15,1	21,9	15,1	17,4	22,2	11,7
13	17,1	20,9	16,4	18,1	21,8	15,5	13	12,4	17,2	11,9	13,8	19,9	10,8
14	16,6	21,7	17,6	18,6	23,7	10,4	14	11,6	19,1	14,9	15,2	21,3	7,0
15	19,9	26,2	20,6	22,2	28	13,8	15	12,4	19,5	14,6	15,5	20,2	9,9
16	19,8	23,9	21	21,6	26,5	15,1	16	12,4	16,5	16	15	18,5	11,0
17	21,6	24,3	17,7	21,2	26,0	17,5	17	13,2	22,1	16,4	17,2	23,9	10,5
18	16	22,7	17,4	18,7	24,2	15,7	18	16,5	27,5	22,6	22,2	29,2	13,8
19	17,3	23	17,4	19,2	23,9	13,8	19	17,6	27,9	19,6	20,7	29,3	16,6
20	16,5	18	14,7	16,4	18,8	14,1	20	18,2	27,8	19,8	20,9	29,2	14,1
21	14,2	19,9	16	16,7	20,3	13,1	21	16,1	20,6	15,8	17,5	22	15
22	14,5	18,8	16,8	16,7	19,5	13,8	22	14,2	20,4	13,4	16,0	21,5	12,2
23	16,5	19	17,3	17,6	21,9	15,6	23	12,7	20,1	13,1	15,3	20,8	9,3
24	18,7	23,7	16,6	19,7	25,5	15,5	24	12,2	20,5	14,3	15,7	21,6	8,5
25	16,0	22,7	16,8	18,5	22,9	14,5	25	14,5	22,0	15,1	17,2	22,6	8,4
26	14,2	19,4	16,7	16,8	20,8	12,0	26	15,6	23,4	16,9	18,5	24,1	12,2
27	15,9	21,2	16,9	18,0	23,1	14,2	27	16,3	23,8	17,0	19,0	24,7	15,7
28	17,2	22,8	17,4	19,1	24,4	14,6	28	15,8	21,3	15,8	17,5	22,8	12,5
29	19,2	20	17,6	18,9	24,5	13,4	29	15,3	18,8	15,6	16,6	19,8	14,6
30	19,7	25	18,3	21	26	13	30	13	21,8	16,1	17	23,4	10,9
31	18,2	23	19	20,1	24,1	14,9	31	15,7	27,7	19,5	21	28,7	12,8

На фиг. № 22 изображены для каждого мѣсяца кривыя максимальныхъ, среднихъ и минимальныхъ температуръ. Изъ диаграммы слѣдуетъ:

Въ июль разность температуръ: наибольшая 5 июля  $t - t_1 = 31,9 - 16,1 = 15,8^{\circ} \text{C.}$ ;  
 наименьшая 20 июля  $t - t_1 = 18,8 - 14,1 = 4,7^{\circ} \text{C.}$ ;  
 Въ августъ разность температуръ: наибольшая 18 авг.  $t - t_1 = 29,2 - 13,8 = 15,4^{\circ} \text{C.}$ ;  
 наименьшая 29 августа  $t - t_1 = 19,8 - 14,6 = 5,2^{\circ} \text{C.}$

Въ среднемъ можно принять для Кіева, что разность температуръ лѣтомъ мѣняется въ теченіе сутокъ отъ  $5^{\circ}$  до  $16^{\circ} \text{C.}$  Изъ той же диаграммы слѣдуетъ, что разность средних температуръ двухъ смежныхъ сутокъ не превосходитъ  $5^{\circ} \text{C.}$

Рѣзкость переходовъ температуры значительно смягчается вліяніемъ досокъ формъ, благодаря ихъ малой теплопроводности. Изъ приведенныхъ соображеній вытекаетъ, что тверднѣе бетона въ водѣ и на морозѣ протекаетъ въ болѣе спокойныхъ тепловыхъ условіяхъ, чѣмъ при лѣтней температурѣ на воздухѣ.



Фиг. № 22.

## 2. Процессы въ твердѣющемъ бетонѣ, вызываемые тепловымъ потокомъ.

Вслѣдствіе постоянства потока тепловой энергіи, при тверднѣніи массива на морозѣ, и при лѣтней температурѣ въ водѣ, происходятъ слѣдующіе процессы:

а) Медленное охлажденіе массива, если количество теплоты, получающееся отъ химическихъ процессовъ тверднѣнія, меньше передающагося отъ массива вѣншей средѣ.

б) Устанавливается стаціонарное состояніе внутри массива, когда количество приобретаемой теплоты равно количеству расходуемой; въ этомъ случаѣ температура въ каждой точкѣ массива остается постоянной, увеличиваясь отъ наружныхъ поверхностей къ центру.

в) Медленное нагрѣваніе массива до температуры вѣншей среды, когда количество развивающейся теплоты окажется болѣе расходуемой массивомъ на отдачу наружной средѣ. Это состояніе, мы полагаемъ, мало вѣроятно въ зимній періодъ и невозможно въ водѣ.

Вслѣдствіе непостоянства теплового потока, при тверднѣніи массива лѣтомъ, происходятъ:

а) При направленіи теплового потока внутрь — сильное согрѣваніе массива, такъ какъ къ теплотѣ, получающейся внутри массива, добавляется получаемая отъ наружной среды. Какъ указывалось равьше, Рыбокуръ наблюдалъ поднятіе температуры до  $46^{\circ} \text{C.}$  Такое же явленіе наблюдалъ и проф. Житкевичъ (см. стр. 47 фиг. № 14). Разница температуръ наружной и внутренней поднялась до  $9,3^{\circ}$ .

Такое явленіе будетъ днемъ, когда температура наружной среды можетъ подняться выше температуры внутреннихъ слоевъ массива.

б) При направленіи потока тепловой энергіи изъ массива можетъ быть или стаціонарное состояніе, подобно рассмотрѣнному выше (въ пунктѣ б).

в) Или медленное нагрѣваніе массива, подобно рассмотрѣнному выше (въ пунктѣ в), но только въ данномъ случаѣ это явленіе весьма вѣроятно и, повидимому, обычно въ періоды пониженія температуръ лѣтомъ (пасмурные дни, ночи).

г) или медленное охлажденіе массива, подобно рассмотрѣнному выше въ пунктѣ а тверднѣнія на морозѣ и въ водѣ.

Изъ приведенныхъ соображеній вытекаетъ, что тверднiе бетона при лѣтней температурѣ протекаетъ въ температурныхъ условiяхъ менѣе спокойныхъ, чѣмъ на морозѣ и въ водѣ.

Такимъ образомъ массивъ, тверднѣющiй на морозѣ или въ водѣ и имѣющiй въ началѣ известный запасъ теплоты, постепенно охлаждается или непрерывно или съ остановками (стаціонарное состоянiе), и только въ рѣдкихъ случаяхъ, по нашему мнѣнiю, мало вѣроятныхъ, происходитъ нагрѣванiе его.

Подъ влиянiемъ потери теплоты, бетонный массивъ будетъ имѣть постоянное стремленiе къ сжатiю; и это будетъ его нормальнымъ состоянiемъ въ теченiе всего перiода тверднiя въ водѣ и при низкихъ температурахъ на воздухѣ. Наоборотъ массивъ, тверднѣющiй при лѣтней температурѣ, будетъ то расширяться, то сжиматься.

Если назовемъ нулевымъ состоянiемъ массива такое, при которомъ онъ не расширяется и не сокращается, то можно сказать, что массивъ, тверднѣющiй въ водѣ или на морозѣ, занимаетъ положенiе по одну сторону нулевого состоянiя, а массивъ, тверднѣющiй на воздухѣ при лѣтней температурѣ, занимаетъ положенiе по обѣ стороны нулевого состоянiя.

### 3. Испаренiе влаги изъ массива лѣтомъ и зимой.

Испаренiе воды, какъ и другихъ жидкостей, происходитъ при всѣхъ температурахъ; ледъ также подверженъ испаренiю. Скорость испаренiя возрастаетъ вмѣстѣ съ температурою. Это обстоятельство легко объясняется на основанiи кинетической теорiи строенiя вещества. Съ повышениемъ температуры, повиднмому, уменьшается дѣйствиe силъ сцепленiя. Въ то же время возрастаетъ средняя скорость движенiя частицъ; благодаря этому обстоятельству для частицъ поверхностнаго слоя жидкости облегчается удаленiе изъ этого слоя.

Зависимость скорости  $v$  испаренiя отъ различныхъ обстоятельствъ достаточно точно опредѣляется по формулѣ, данной Dalton'омъ, который нашелъ, что  $v$  пропорционально свободной поверхности  $S$  жидкости, и пропорционально разности между упругостью  $P$  насыщенныхъ паровъ при температурѣ испаряющейся жидкости и упругостью  $p$  паровъ, уже находящихся надъ жидкостью; кромѣ того, онъ нашелъ, что эта скорость обратно пропорциональна упругости  $H$  воздуха, находящагося надъ жидкостью. Формула Dalton'a слѣдующая  $v = \frac{CS}{H} (P - p)$ , гдѣ  $C$  — постоянный множитель, зависящiй отъ скорости движенiя воздуха. Laval исправилъ эту формулу такъ  $v = \frac{CS}{H^n} (P - p)$ , гдѣ  $n = 1,18$  для воды.<sup>1)</sup>

Опредѣленiе количества водяныхъ паровъ, находящихся въ данное время и въ данное время въ атмосферѣ служить предметомъ гигрометрiи.

Обыкновенно отличаютъ абсолютную и относительную влажность. Абсолютная влажность опредѣляется числомъ  $f$  граммовъ водяныхъ паровъ, содержащихся въ одномъ кубическомъ метрѣ воздуха. Относительной влажностью  $w$  считаютъ отношенiе числа  $f$  къ тому числу  $F$  граммовъ пара, которое необходимо, чтобы довести 1 куб. метръ воздуха при данной температурѣ  $t$  до насыщенiя; это отношенiе принято выражать въ  $\%$ ; отсюда слѣдуетъ, что относительная влажность  $w = 100 \frac{f}{F}$  показываетъ, сколько находящагося въ воздухѣ количества паровъ составляетъ процентовъ отъ наибольшаго возможнаго при данной температурѣ количества.

Принято считать, что паръ до насыщенiя слѣдуетъ закону Мариотта при не очень высокихъ температурахъ; поэтому формулу можно написать такъ  $w = 100 \frac{P}{P}$ . Значенiя

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики. С. Петербургъ 1905. Томъ III, стр. 484, 589.

$p$  и  $P$ , тѣ же, что и въ законѣ Dalton'a. Взаимотношеніе между  $f$  и  $p$  выражается формулою  $f = \frac{1,0582}{1 + \alpha t} p \dots$ <sup>1)</sup> гдѣ:  $\alpha$  — коэффициентъ расширенія газовъ,  $p$  — сила испаренія или упругость газовъ, обнаруживающая давленіе на окружающую среду, выражена въ м. м. ртутнаго столба, который она способна уравновѣсить.

Какъ показываетъ формула,  $f$  и  $p$  случайно мало отличаются другъ отъ друга.

Сравнивая формулы для  $\omega$ , получаемъ  $f : p = F : P$ ; отсюда приходимъ къ выводу, что  $F$  и  $P$  также мало отличаются другъ отъ друга.

Для сравненія составимъ таблицу для  $F$  и  $P$ .

ТАБЛИЦА № 26.

Температура С <sup>0</sup>	Упругость пара <sup>4)</sup> $P$ миллим.	Количество пара <sup>3)</sup> $F$ грамм.	Температура С <sup>0</sup>	Упругость пара <sup>2)</sup> $P$ миллим.	Количество пара $F$ грамм.	Температура С.	Упругость пара <sup>2)</sup> $P$ миллим.	Количество пара $F$ грамм.
— 20	0,96	1,1	— 4	3,34	3,6	13	11,16	11,3
— 19	1,05	1,2	— 3	3,63	3,9	14	11,91	12
— 18	1,14	1,3	— 2	3,93	4,2	15	12,70	12,8
— 17	1,24	1,4	— 1	4,23	4,5	16	13,54	13,6
— 16	1,33	1,5	0	4,60	4,9 <sup>2)</sup>	17	14,42	14,4
— 15	1,43	1,6	1	4,94	5,2	18	15,36	15,3
— 14	1,52	1,7	2	5,30	5,6	19	16,35	16,2
— 13	1,71	1,9	3	5,69	6,0	20	17,39	17,2
— 12	1,80	2,0	4	6,10	6,4	21	18,50	18,2
— 11	1,99	2,2	5	6,53	6,8	22	19,66	19,3
— 10	2,09	2,3	6	7,00	7,3	23	20,89	20,4
— 9	2,28	2,5	7	7,49	7,7	24	22,18	21,6
— 8	2,47	2,7	8	8,02	8,3	25	23,55	22,9
— 7	2,66	2,9	9	8,57	8,8	26	24,99	24,2
— 6	2,86	3,1	10	9,16	9,4	27	26,51	25,6
— 5	3,14	3,4	11	9,79	9,9	28	28,10	27,0
— 4	3,34	3,6	12	10,46	10,6	29	29,78	28,5
						30	31,55	30,1

Для наглядности данныя 1-го и 3-го столбца представлены на прилагаемой диаграммѣ № 23.

Изъ диаграммы видно, что упругость и количество пара съ повышеніемъ температуры сначала увеличиваются мало, особенно въ предѣлахъ низкихъ температуръ до 0, а отсюда начинаютъ сильно увеличиваться.

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики. Петербургъ 1905. Томъ III, стр. 589.

<sup>2)</sup> Федотьевъ. Физико-химическія таблицы. Петербургъ 1901 г. стр. 204, 416.

<sup>3)</sup> Павловскій А. К. Курсъ отопленія и вентиляціи. Петербургъ 1906 г. стр. 298.

<sup>4)</sup> Упругость пара при  $t =$  отъ  $(-20^{\circ})$  до  $(0^{\circ})$  подсчитана нами по формулѣ  $P = 0,943(1 + 0,003665t) F$ .

Въ приведенной таблицѣ № 26 данныя  $P$  и  $F$  относятся къ 1-му куб. метру воздуха, насыщеннаго парами воды. Количество паровъ въ атмосферѣ, какъ указывалось раньше, опредѣляется въ процентахъ отъ полного насыщения. Приведемъ метеорологическія данныя Кіевскаго Политехническаго Института за лѣтній и зимній мѣсяцы 1917 года (таблица № 27).

Средняя температура (столбцы 2-й и 7-й), средняя влажность — абсолютная  $p$  (столбцы 4-й и 9-й) и относительная  $\omega$  (столбцы 5-й и 10-й) получались такимъ образомъ: измѣренія производились три раза въ день — 7 ч. утра, 1 ч. дня и 9 ч. вечера; среднее арифметическое трехъ наблюденій внесено въ таблицу. По относительной влажности  $\omega$  опредѣлены величины  $P$  (столбцы 3-й и 8-й).

Строго говоря величины  $P$  и  $p$  представляютъ не величины, а упругость пара, но, такъ какъ величины  $P$  и  $F$ ,  $p$  и  $f$  по случайности совпадаютъ, то при записи метеорологическихъ наблюдений  $P$  и  $p$  выражаютъ влажность.

Для наглядности представимъ на диаграммѣ № 24 величины  $P$  и  $p$ .

Изъ разсмотрѣнія диаграммы № 24 и таблицы № 27 приходимъ къ следующимъ выводамъ, если принять типичными (для Кіева) для лѣта и зимы выбранные мѣсяцы.

1) Наибольшее количество паровъ воды, необходимое для насыщения одного кубического метра воздуха лѣтомъ (за 5 июля) въ  $5\frac{1}{2}$  разъ больше, чѣмъ такое же (за 11 февраля) для зимы.

2) Наибольшая абсолютная влажность лѣтомъ (6 июня) въ  $5\frac{1}{2}$  разъ больше, чѣмъ таковая зимой (16 февраля).

3) Наименьшая абсолютная влажность лѣтомъ (3 июля) въ 1,8 раза больше таковой зимой (19 февраля).

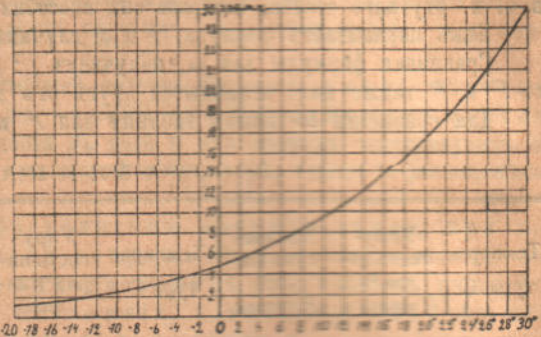
4) Колебаніе средней абсолютной влажности двухъ смежныхъ дней лѣтомъ доходитъ до (6 и 7 июля) 6 ч. м., а зимой (16 и 17 февр.) до 1,8 ч. м., т. е. въ 3,3 раза больше.

5) На диаграммѣ представлена (1-ая и 3-ая кривыя) абсолютная влажность для зимы для средняя изъ трехъ наблюдений (7 ч. утра, 1 ч. дня и 9 ч. вечера).

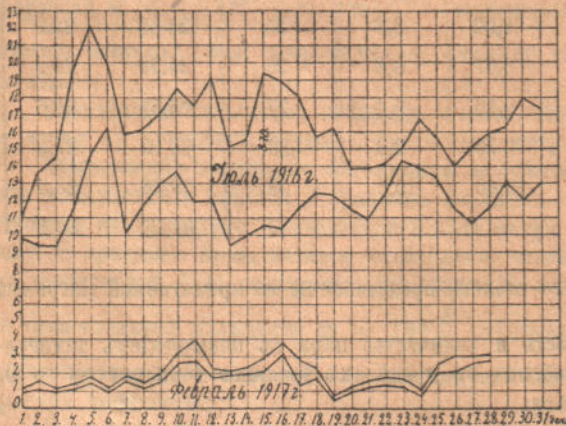
Въ действительности происходятъ довольно значительныя колебанія въ течение сутокъ, сообразно съ колебаніемъ температуры воздуха.

Если сравнить всѣ эти колебанія на диаграммѣ, то каждый прямолинейный участокъ прямой превратится въ ломаную изъ трехъ прямыхъ.

6) По формулѣ Dalton'a скорость испаренія пропорциональна разности ( $P-p$ ). На диаграммѣ эта разность выражается для любого дня отрѣзкомъ между кривыми  $P$  и  $p$ . Какъ видно изъ диаграммы разность эта для лѣта, по сравненію съ зимой, весьма велика;



Фиг. № 23.



Фиг. № 24.

ТАБЛИЦА № 27.

Июль 1916 года.					Февраль 1917 года.				
Числа по номеру стилю.	Средняя температура дня $^{\circ}\text{C}$ .	Средняя влажность насыщ. пар. воздуха $P^{(2)}$ милл.	Средняя абсолютная влажность $P^{(1)}$ милл. (1).	Средняя относительная влажность $\omega_{0/0}$ (1).	Числа по номеру стилю.	Средняя температура дня $^{\circ}\text{C}$ .	Средняя влажность насыщ. пар. воздуха $P^{(2)}$ милл.	Средняя абсолютная влажность $P^{(1)}$ милл. (1).	Средняя относительная влажность $\omega_{0/0}$ (1).
1	12,8	10,85	9,8	90	1	-17,9	1,10	0,8	73
2	16,3	13,60	9,4	69	2	-14,2	1,51	1,1	73
3	17,2	14,50	9,3	64	3	-17,1	1,11	0,9	81
4	22,2	19,50	11,5	59	4	-15,5	1,38	1,1	80
5	24,5	22,7	14,6	66	5	-12,3	1,75	1,4	80
6	22,5	19,80	16,2	82	6	-16,8	1,14	0,9	79
7	18,7	15,80	10,1	64	7	-12,3	1,79	1,5	84
8	19,3	16,12	11,6	72	8	-15,2	1,47	1,1	75
9	19,7	17,00	12,9	76	9	-10,6	2,00	1,5	75
10	21,3	18,50	13,7	74	10	- 4,6	3,21	2,6	81
11	20,8	17,50	11,9	68	11	- 2,4	3,97	2,7	68
12	21,6	19,05	12,0	63	12	- 9,5	2,24	1,7	76
13	18,1	15,15	9,4	62	13	- 9,8	2,15	1,8	84
14	18,6	15,64	10,0	64	14	- 9	2,35	1,9	81
15	22,2	19,30	10,6	55	15	- 6,2	2,92	2,1	72
16	21,6	18,95	10,4	55	16	- 2,7	3,74	3,1	83
17	21,2	18,00	11,5	64	17	- 7,7	2,72	1,3	48
18	18,7	15,70	12,4	79	18	- 9,6	2,24	1,7	76
19	19,2	16,20	14,3	76	19	-21,0	0,72	0,5	69
20	16,4	13,88	11,5	83	20	-16,7	1,23	0,9	73
21	16,7	13,82	10,9	79	21	-14,0	1,52	1,2	79
22	16,7	14,15	12,3	87	22	-12,1	1,71	1,3	76
23	17,6	15,05	14,3	95	23	-12,7	1,69	1,2	71
24	19,7	16,74	13,9	83	24	-18,6	1,01	0,7	69
25	18,5	15,60	13,4	86	25	-10,4	2,50	2,0	80
26	16,8	14,00	11,6	83	26	- 5,7	3,00	2,1	70
27	18,0	15,10	10,7	71	27	- 5,5	3,00	2,6	87
28	19,1	15,95	11,5	72	28	- 5,1	3,14	2,7	86
29	18,9	16,25	13,0	80					
30	21,0	17,92	12,0	67					
31	20,1	17,35	13,0	75					

1) Данные Киевского Политехнического Института.

2) Федотьевъ Физико-химическія таблицы. Петербургъ 1901, стр. 204.

такъ наибольшая разность въ июль (15-го)  $9,30 - 10,6 = 8,70$  м. м., а наибольшая разность въ февраль (17-го)  $2,72 - 1,3 = 1,42$  м. м., т. е. лѣтомъ въ 6,1 раза больше, чѣмъ зимой.

Всѣ указанныя выше данныя приведены для Кіева.

Если взять мѣста съ болѣе континентальнымъ климатомъ, то рѣзкость колебаній влажности еще болѣе увеличится.

Приведенная выше формула Dalton'a для скорости испаренія относится къ сосудамъ, наполненнымъ водой. Твердѣющій бетонный массивъ представляетъ пористое тѣло, поры котораго заполнены водой. Поэтому можно предположить, что скорость испаренія будетъ выражаться какъ то иначе.

Интересны изслѣдованія Stefan'a<sup>1)</sup>, который доказалъ, что количество пара, образующагося въ данное время, во многихъ случаяхъ пропорціонально не самой величинѣ поверхности жидкости, какъ обыкновенно полагаютъ, но ея линейнымъ размѣрамъ. Stefan изслѣдовалъ вопросъ о скорости испаренія жидкостей, помещенныхъ въ вертикальныхъ трубкахъ, въ которыхъ надъ самою поверхностью жидкости образуется слой насыщеннаго пара, медленно диффундирующаго къ верхнему отверстию трубки; надъ отверстиемъ плотность пара, разбѣивающагося во вѣшнемъ пространствѣ принимается равной нулю. Stefan показалъ, что при этихъ условіяхъ скорость испаренія обратно пропорціональна разстоянію уровня жидкости отъ верхняго конца трубки. Поры бетона, заполненыя водой, представляютъ до нѣкоторой степени трубки и поэтому, вѣроятно, законъ испаренія происходитъ согласно изслѣдованію Stefan'a.

Изъ приведенныхъ соображеній видно, что испареніе воды изъ бетоннаго массива представляетъ явленіе сложное. Массивъ же, твердѣющій въ деревянныхъ формахъ, и испаряющій влагу черезъ доски, находится въ еще болѣе сложныхъ условіяхъ. При твердѣніи бетона на морозѣ дополнительнымъ усложняющимъ условіемъ можетъ быть корка льда на наружныхъ поверхностяхъ массива.

Для приближенныхъ вычисленій, мы полагаемъ, можетъ быть принята формула Dalton'a, если надлежаще принять коэффициентъ  $C$ .

Возвращаясь, послѣ всѣхъ приведенныхъ выше соображеній, къ диаграммѣ № 24, мы приходимъ къ слѣдующему заключенію.

1) Лѣтомъ абсолютная влажность воздуха очень велика. Амплитуды колебаній какъ дня и ночи, такъ и двухъ смежныхъ сутокъ тоже очень велики.

При повышеніи температуры, недостающая въ воздухѣ влажность, т. е. число граммовъ пара въ 1 куб. метрѣ, выражаясь образно, высасывается изъ воздуха изъ гигроскопическихъ тѣлъ, которыя въ немъ находятся, и изъ водоемовъ.

Между влажностью воздуха и влажностью тѣлъ, находящихся въ воздухѣ, существуетъ извѣстное равновѣсное состояніе: при недостаткѣ въ воздухѣ влаги—тѣла испаряютъ, при избыткѣ ея въ воздухѣ—тѣла поглощаютъ. Въ твердѣющемъ бетонѣ находится избытокъ влаги. Поэтому происходитъ, во все время твердѣнія, испареніе влаги изъ массива.

2) Зимой абсолютная влажность воздуха ничтожна.

Амплитуды колебаній, какъ видно изъ диаграммы (фиг. № 24), тоже малы. Поэтому испареніе влаги изъ тѣлъ тоже ничтожно.

Изъ приведенныхъ соображеній становится яснымъ необходимость поливки лѣтомъ твердѣющаго бетона и принятіе предохранительныхъ мѣръ для уменьшенія испаренія влаги — окутываніе поверхностей бетона пескомъ, мѣшками, рогожами и т. д.

Изъ тѣхъ же соображеній слѣдуетъ, что зимой поливка бетона излишня, а окутываніе поверхности бетона навозомъ, о чемъ говорилось раньше, имѣетъ цѣлью не предохраненіе бетона отъ испаренія влаги, а защиту отъ потери теплоты массивомъ. Можно предполагать, что испаряющаяся влага съ поверхности бетона надъ навозомъ быстро насыщаетъ имѣющийся тамъ воздухъ, и испареніе прекращается. Насыщенный паръ весьма плохой проводникъ тепла, поэтому онъ уменьшаетъ потерю его массивомъ.

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики. Петербургъ 1905. Томъ III, стр. 484.

#### 4. Качество бетона слѣланнаго на морозѣ.

Сравнивая различныя обстоятельства, сопровождающія твердѣніе бетона на морозѣ, въ водѣ и при лѣтней температурѣ на воздухѣ, подробно разобранныя выше, мы приходимъ къ заключенію, что условія твердѣнія бетона на морозѣ представляютъ нѣчто среднее между условіями твердѣнія въ водѣ и на воздухѣ.

Отсюда непосредственно вытекаетъ другое весьма важное слѣдствіе. Какъ указывалось раньше, бетонъ, твердѣющій въ водѣ, увеличивается въ объемѣ, а бетонъ, твердѣющій при лѣтней температурѣ на воздухѣ, сокращается въ объемѣ. Промежуточные условія дадутъ и промежуточный результатъ, а именно—бетонъ, твердѣющій на морозѣ, не увеличивается и не сокращается въ объемѣ, т. е. не измѣняетъ своего объема; точнѣе говоря, будутъ происходить колебанія въ сторону увеличенія или сокращенія объема, такъ сказать—колебанія около нулевого состоянія, но эти колебанія должны быть незначительны.

Разсмотримъ, какія послѣдствія вызываетъ высказанное положеніе въ твердѣющемъ бетонномъ массивѣ.

На страницѣ 32 (фиг. № 11) приведена діаграмма усадки твердѣющаго чистаго цементнаго раствора (кривая А<sub>1</sub>), и цемента-песчаннаго раствора 1:3 (кривая В<sub>1</sub>). Консидеръ наблюдалъ, послѣ наибольшаго относительнаго сжатія въ періодъ схватыванія между 6 и 10 часами на воздухѣ, переходъ къ удлиненію, продолжавшемуся въ теченіи 3-хъ дней. Консидеръ объясняетъ усиленное сокращеніе объема въ первые 10 часовъ схватыванія, влияніемъ усиленнаго испаренія влаги благодаря теплотѣ, выдѣлившейся при химическихъ процессахъ. Дальнѣйшее расширеніе произошло подъ влияніемъ оставшагося избытка теплоты.

При твердѣніи на морозѣ такого ненормальнаго физическаго процесса предполагать нельзя.

Въ § 18, рассмотрѣны внутреннія напряженія въ твердѣющихъ растворахъ и бетонахъ.

Консидеръ нашелъ, что, при твердѣніи раствора въ водѣ, въ желѣзѣ появляется внутреннее растяженіе 1200 кил. на см.<sup>2</sup>, а въ растворѣ сжатіе 69,1 кил. на см.<sup>2</sup>.

Бахъ опредѣлилъ внутреннія напряженія въ желѣзобетонной призмѣ (составъ бетона 1:4) при твердѣніи на воздухѣ; сжимающее усиліе въ желѣзѣ 430 кил. на см.<sup>2</sup>; растягивающее усиліе въ бетонѣ 3,4 кил. на см.<sup>2</sup>.

Такія же внутреннія напряженія возникаютъ и въ бетонѣ при положеніи новаго слоя бетона на старомъ.

При твердѣніи бетона на морозѣ, внутреннихъ напряженій не будетъ, вслѣдствіе отсутствія усушки и увеличенія объема.

При отсутствіи внутреннихъ напряженій, которые соотвѣтственнымъ образомъ понижаютъ наблюдаемыя напряженія, мы должны получить большія временныя, а слѣдовательно и допускаемыя напряженія.

Какъ указывалось раньше (стр. 38), относительная усушка цементнаго раствора въ нѣсколько разъ больше, чѣмъ для камневидныхъ (изъ чистаго цемента въ 6,3 раза, а изъ раствора 1:3 въ 2,5 раза больше, чѣмъ для гранитнаго щебня). Поэтому въ щебеночномъ бетонѣ, при твердѣніи на воздухѣ, возникаютъ внутреннія напряженія. Камневидныя въ уплотненной массѣ бетона, плотно упираясь другъ въ друга, препятствуютъ полному измѣненію объема раствора. При твердѣніи на морозѣ, вслѣдствіе отсутствія усушки, наличность внутреннихъ напряженій отпадаетъ, а вмѣстѣ съ этимъ должны возрастать плотность, упругость и крѣпость.

Въ § 20 рассмотрѣны совмѣстныя влиянія влажнѣости и вѣншей температуры на растворы и бетоны. При пониженіи температуры эти влиянія суммируются арифметически для бетоновъ, твердѣющихъ на воздухѣ при лѣтней температурѣ.



Наружные слои твердящего массива наиболее подвержены совокупному влиянию обоих указанных факторовъ. Въ бетонахъ, твердящихъ на воздухѣ лѣтомъ, ядро твердѣнія зарождается на наружныхъ слояхъ и распространяется внутрь массива. Поэтому наружные слои, твердящіе раньше внутреннихъ, сокращаются подъ влияніемъ совокупности причинъ—вышней температуры и влажности—и сжимаютъ внутренніе слои бетона, а сами расширяются. Получаются внутреннія напряженія: растягивающія усилія въ наружныхъ слояхъ и сжимающія во внутреннихъ; первыя больше вторыхъ.

Въ данномъ случаѣ явленіе будетъ аналогично съ усушкой дерева. Усыханіе наружныхъ годичныхъ слоевъ (колець), содержащихъ болѣе влаги, будетъ болѣе интенсивнымъ, чѣмъ внутреннихъ, болѣе плотныхъ; внутренніе слои мѣшаютъ этому сокращенію, поэтому наружные слои, сжимая внутреннія, растягиваются сами, и, если внутреннія напряженія больше предѣла упругости, разрываются, и на деревѣ появляются одна или нѣсколько трещинъ.

Въ бетонѣ явленіе усложняется неодинаковыми коэффициентами расширенія и неодинаковой усушкой раствора и камневидныхъ.

При твердѣніи бетона въ водѣ или на морозѣ ядро твердѣнія зарождается внутри массива и распространяется къ наружнымъ слоямъ, поэтому наружные слои отвердѣваютъ позже внутреннихъ, и возможность появленія внутреннихъ напряженій отпадаетъ.

### § 37. Способъ производства бетонныхъ работъ на морозѣ.

На фигурѣ № 19 изображена кривая, по которой происходитъ процессъ схватыванія и твердѣнія бетона. Вся задача веденія работъ на морозѣ заключается въ томъ, чтобы процессъ схватыванія прошел до точки *a* при температурѣ воды выше нуля. Какъ указывалось раньше, температура воды можетъ опуститься и ниже нуля, но при условіи, что реакція схватыванія уже началась. Въ этомъ случаѣ реакція замереть, лишь только вода начнетъ замерзать, но опять возродится, лишь только температура поднимется выше точки замерзанія. Можно допустить, что вода, имѣющая температуру ниже 4° Цельсія, уже вредна для реакціи цемента, если вѣрно предположеніе Roentgen'a, что холодная вода представляетъ изъ себя растворъ льда въ водѣ. Нами на практикѣ неоднократно наблюдалось, что цементный растворъ (бетонъ), затворенный на холодной водѣ ниже 4-хъ градусовъ и затвердѣвавшій при температурахъ, близкихъ къ 0°, легко крошился въ рукахъ, и вообще представлялъ продуктъ плохого качества. Поэтому мы полагаемъ, что на работахъ, даже при температурахъ выше нуля, не слѣдуетъ затворять цементный растворъ (бетонъ) водою, имѣющей температуру ниже 4° Цельсія.

Для того, чтобы процессъ схватыванія закончился, т. е. по кривой вышелъ до точки *a*, необходимо, чтобы твердящій бетонный массивъ, постепенно охлаждающійся, имѣлъ въ себѣ запасъ теплоты на все время схватыванія *OA* (см. диаграмму № 20).

Для опредѣленія времени *OA*, можно воспользоваться опытами Тетмайера. Въ главѣ VIII-й приводился опытъ Тетмайера, что цементный растворъ (1 : 3) при температурѣ замерзанія началъ сватываться черезъ 21 час. послѣ затворенія, а процессъ сватыванія наступилъ черезъ 38 часовъ.

Такимъ образомъ, округляя, можно положить 36 часовъ—1½ сутокъ на процессъ схватыванія *OA* при цементныхъ растворахъ состава: 1 : 2, 1 : 2,5, 1 : 3. Эти растворы обычны, какъ самостоятельные растворы при каменной и кирпичной кладкѣ, такъ и входящіе въ составъ замазки въ составъ бетона. Для жѣлзобетонныхъ сооруженій составы бетона: песчаного—1 : 3 и щебеночнаго—1 : 2 : 3, 1 : 2 : 4, 1 : 2½ : 4 и 1 : 3 : 4 являются наиболее часто примѣняемыми.

При выясненіи количества теплоты, которое долженъ заключать въ себѣ твердящій бетонный массивъ для всего процесса схватыванія, мы встрѣчаемъ рядъ затрудненій. Количество теплоты въ твердящемъ бетонномъ массивѣ складывается изъ двухъ слагаемыхъ.

Первое слагаемое — самостоятельный источникъ теплоты, выдѣляющейся при схватываніи и твердѣніи цемента.

Второе слагаемое — то количество теплоты, которое необходимо дать твердѣющему бетонному массиву посредствомъ подогреванія составныхъ частей бетона: воды, щебня и (если нужно) песку. Разсмотримъ каждое слагаемое отдѣльно.

### Количество теплоты, выдѣляемой твердѣющимъ бетономъ.

Экзотермическія реакціи, происходящія при схватываніи и твердѣніи цемента разсмотрѣны подробно въ главѣ VII. Постараемся выяснить, какъ велико количество теплоты, выдѣляемое однимъ килограммомъ цемента. Для этого воспользуемся опытами Герцога (см. стр. 46) и діаграммой проф. Житкевича (см. стр. 47). Герцогъ нашелъ, что при затвореніи 9 килограммовъ медленно схватывающагося цемента, температура раствора черезъ 7 часовъ поднялась на  $16^{\circ}$  С., а при затвореніи 32 килогр. — на  $30,5^{\circ}$ . Теплоемность цемента можно принять 0,2.

Количество теплоты, имѣвшей въ наличности въ цементномъ растворѣ черезъ 7 часовъ послѣ затворенія 9 кил. цемента —  $9 \times 0,2 \times 16 = 28,8$  калорій; на 1 килогр. —  $28,8 : 9 = 3,2$  калорій въ час. Аналогичное количество теплоты, выдѣлившейся при затвореніи 32 килогр. цемента —  $32 \times 0,2 \times 30,5 = 195,2$  калорій, а на 1 килогр. —  $195,2 : 32 = 6,1$  калорій.

Въ второмъ случаѣ количество теплоты выдѣлилось почти вдвое больше. Это явленіе объясняется тѣмъ, что отношеніе поверхности къ объему занимаемому цементомъ, или удѣльная поверхность, при 9 килогр. цемента будетъ гораздо больше, чѣмъ при 32 килогр. цемента. Вслѣдствіе этого охлажденіе меньшаго образца съ 9 килогр. цемента будетъ, по отношенію къ 1-му килограмму, больше, чѣмъ въ большемъ образцѣ съ 32 килогр. цемента. Въ опытахъ Герцога не указано, при какихъ условіяхъ производилось наблюденіе поднятія температуры — былъ ли массивъ въ формахъ или безъ формъ, а также не указаны и матеріалъ формъ (деревянныя или желѣзныя). Поэтому не представляется возможнымъ опредѣлить всеобщій коэффициентъ передачи тепла  $K$ , а слѣдовательно и охлажденіе массива.

Опредѣлимъ, какое количество тепла, считая на 1 кил. цемента, выдѣлилось въ опытѣ проф. Житкевича. Описаніе опыта и діаграмма температуръ приведены на стр. 46 и 47. Составъ бетона 1 : 3 : 7. Въ описаніи опыта не указано, изъ досокъ какой толщины были сдѣланы формы, и когда эти формы сняты.

Мы рѣшаемъ задачу въ предположеніи, что формы деревянныя изъ досокъ толщиной 1 дюйм. и не снимались въ теченіе всего періода наблюденія температуръ, т. е. въ теченіе 60 дней.

Толщина стѣны  $a = 5$  ф. = 1,524 метра,  $\frac{1}{2} a = 76,2$  см.  $\frac{1}{4} a = 38,1$  см.;  $\frac{1}{8} a = 19,05$  см.

Какъ видно изъ діаграммы (фиг. № 14), для каждого дня приведены среднія температуры за цѣлый день. Слѣдовательно, то количество теплоты, которое теряется массивомъ при охлажденіи, восстанавливается внутреннимъ источникомъ теплоты. Такимъ образомъ, опредѣливъ количество теплоты, теряемой въ 1 часъ массивомъ, мы опредѣлимъ количество теплоты, выдѣляемой при химическихъ реакціяхъ схватыванія и твердѣнія. Отнеся это количество къ 1-му килограмму цемента, мы получимъ количество теплоты, выдѣляемой 1 килогр. цемента.

Выдѣлимъ изъ середины стѣны призму, имѣющую основаніе 1 кв. метръ и длину, равную толщинѣ стѣны. Объемъ этой призмы равенъ 1,524 куб. метр. Поверхностями охлажденія этой призмы будутъ служить оба основанія, каждое равное 1 кв. метру.

Коэффициентъ потери теплоты черезъ лучеиспусканіе и соприкосновеніе съ воздухомъ по формулѣ Пекле

$$Q = l + S + (0,0075 l + 0,0056 S) (t - t_1); \text{ гдѣ:}$$

$l$  — коэффициентъ потери теплоты отъ соприкосновенія съ воздухомъ. По Валеріусу и Грасгофу для подвижнаго воздуха  $l = 6$ , для неподвижнаго  $l = 5$ .

$S$  — коэффициентъ потери теплоты отъ лучеиспускания;  $S = 3,6$  (для сосны поперекъ волоконъ).

$t - t_1 = 2$  (по таблицѣ Ритчеля для дерева).

$Q_1 = 6 + 3,6 (0,0075 \times 6 + 0,0056 \times 3,6)2 = 9,73$  калор. съ 1 кв. метр. наружной поверхности въ 1 часъ.

$Q_2 = 5 + 3,6 + (0,0075 \times 5 + 0,0056 \times 3,6)2 = 8,72$  калор. съ 1 кв. метра внутренней поверхности каземата въ 1 часъ.

Всеобщій коэффициентъ передачи тепла снаружи каземата

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{Q_1} + \frac{e}{\lambda}}, \text{ гдѣ: } e \text{ — толщина доски} = 1 \text{ дюйм} = 0,025 \text{ метр.}, \lambda \text{ — коэффициентъ теплопроводности сосны} = 0,093.$$

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{9,73} + \frac{0,025}{0,093}} = 2,67.$$

Всеобщій коэффициентъ передачи тепла внутрь каземата опредѣлится по той же формулѣ, подставивъ  $Q_2$  вмѣсто  $Q_1$ ;  $K_2 = 2,61$ .

$K_1$  и  $K_2$  мало отличаются другъ отъ друга, поэтому для расчета можно взять среднее  $K = 2,64$ .

Полная потеря теплоты массивомъ опредѣлится по формулѣ  $W = 2 F \cdot K \cdot [T - t]$ ;  $F = 1 \text{ мт.}^2$ ;  $W = 2 K \cdot [T - t]$ , гдѣ:

$T$  — температура поверхности стѣны, соприкасающейся съ досками формъ,  $t$  — температура наружной среды.

Для рѣшенія уравненія необходимо опредѣлить  $T$ .

$T$  опредѣляется изъ слѣдующихъ соображеній.

Разматривая часть сѣченія стѣны отъ середины къ краю, мы видимъ, что здѣсь установилось стационарное тепловое состояніе стѣны, т. е. температура въ любомъ сѣченіи стѣны установилась постоянная для нѣкотораго промежутка времени, въ зависимости отъ постоянства наружной температуры. Температура  $T$  въ любой точкѣ стѣны въ этомъ случаѣ опредѣлится уравненіемъ.

$$T = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{d} x \text{ гдѣ:}$$

$t_1, t_2$  — температуры въ опредѣленныхъ точкахъ стѣны;

$d$  — разстояніе между этими точками;

$x$  — разстояніе отъ начала координатъ до точки, въ которой опредѣляется температура.

Принимая за начало координатъ ось симметріи сѣченія стѣны, а ось  $x$ -овъ по направленію толщины стѣны, можемъ опредѣлить температуру на наружной поверхности стѣны.

Въ данномъ случаѣ извѣстны: температура въ срединѣ стѣны —  $t_{\text{ср}}$ , температура на разстояніи  $\frac{1}{3}$  толщины стѣны отъ наружной поверхности —  $t_1$ , разстояніе между этими двумя точками —  $d = 56,97$  сант., разстояніе отъ средины стѣны до края —  $x = 76,2$  сант. На основаніи диаграммы (фиг. № 14) и вышерассужденныхъ формулъ составляемъ таблицу № 28.

Температура наружной среды  $t$  опредѣлена, какъ средняя изъ двухъ температуры внутри каземата и температуры снаружи каземата.

Опредѣлимъ количество матеріаловъ въ 1 куб. метрѣ утравливаннаго бетона состава 1 : 3 : 7.

На основаніи данныхъ Керстена<sup>2)</sup>, тщательно провѣренныхъ нами:  
1 кил. портланд-цемента + 29% воды даетъ 0,635 литра твердой массы.  
1 литръ цемента + 29% воды даетъ 0,813 литра твердой массы.

<sup>1)</sup> Хвольсонъ. Курсъ физики. Петербургъ 1905 г. Томъ III, стр. 272.

<sup>2)</sup> Керстенъ. Желѣзобетонныя сооруженія. Переводъ Каменецкаго. Петербургъ 1908 г. страница 22.



1 литръ мелкаго песку (0,30 литр. пустотъ) съ прибавкой 15% даётъ 0,345 л. пустотъ.  
 3 " " " (0,30 " " ) " " " 1,035 " "

Слѣдовательно 1 литръ цемента и 3 литра песку даютъ:

$$0,813 + 3 - 1,035 = 2,778 \text{ литровъ раствора.}$$

1 литръ щебня (0,50% пустот.) съ добавкой 15% даётъ 0,575 л. пустотъ  
 7 " " (0,50% " ) " " 15% " 4,025 " "

1 литръ цемента + 3 литра песку + 7 литр. щебня даютъ:

$$2,778 + 7 - 4,025 = 5,753 \text{ литровъ бетона.}$$

На 1 куб. м. = 1000 литр. бетона—идуть  $1000 : 5,753 = 175$  частей

Смѣсь 1 : 3 : 7 состоитъ изъ:

Цементу (1 ч.) 175 литра  $175 \times 1,28 = 224$  килогр.

Песку (3 ч.) 522 литра

Щебня (7 ч.) 1218 литровъ.

Объемъ изслѣдуемаго нами массива равенъ  $1 \times 1 \times 1,524 = 1,524$  куб. метра. Количество цемента въ этомъ массивѣ равно:  $224 \times 1,524 = 340$  килогр.

Теченіе химическихъ реакцій при схватываніи порландъ-цемента и выдѣленіе теплоты намъ представляется въ такомъ видѣ.

При добавленіи воды къ цементно-песчаному раствору начинается теченіе описанныхъ раньше реакцій по Лешателье. Въ первую очередь вступаютъ въ реакцію самыя мелкія зерна алита, — наиболѣе мелкая цементная пыль, а болѣе крупныя только съ поверхности. Добавка песку замедляетъ схватываніе и, слѣдовательно, уменьшаетъ количество тепла, выдѣляемаго твердѣющимъ цементомъ въ единицу времени. Этимъ объясняется то обстоятельство, что максимальный подъемъ температуры наблюдается черезъ нѣсколько дней послѣ окончанія кладки, слѣдовательно значительно позже, чѣмъ при затвореніи чистаго цемента.

Въ этотъ періодъ выдѣляется значительное количество теплоты.

Въ послѣдующее время вступаютъ въ соединеніе съ водою среднія части крупныхъ зеренъ алита, защищенныхъ желатинозною оболочкой уже вступившихъ въ реакцію наружныхъ слоевъ зеренъ алита. Эта реакція продолжается долгое время, постепенно замирая, по мѣрѣ разложенія крупныхъ зеренъ алита. Какъ указывалось въ главѣ VII, наблюдался подъемъ температуры черезъ годъ послѣ окончанія кладки.

Выдѣлившаяся въ первый періодъ въ большомъ количествѣ теплота поднимаетъ температуру массива выше наружной среды. Вслѣдствіе разности температуръ начинается охлажденіе массива. Въ первые дни выдѣленіе теплоты при реакціи значительно превосходитъ потерю на охлажденіе (въ зависимости отъ формы сооруженія или, точнѣе говоря, отъ отношенія поверхности охлажденія къ объему); и температура массива повышается, пока не наступитъ равновѣсіе между количествомъ теплоты, теряемымъ на охлажденіе и получаемымъ отъ экзотермической реакціи. Устанавливается на нѣкоторое время постоянная температура. Затѣмъ количество теплоты, теряемое на охлажденіе, превосходитъ получаемое массивомъ отъ реакціи—и начинается медленное охлажденіе массива.

Процессъ происходитъ, повидимому, плавно и равномерно. Строго теоретически рѣшить задачу не представляется возможнымъ вслѣдствіе большой сложности процессовъ, сопровождающихъ схватываніе и твердѣніе цемента, о чемъ подробно говорилось въ главѣ VII. При процессахъ схватыванія и твердѣнія количество свободной воды въ единицѣ объема уменьшается, вслѣдствіе этого появляются въ массѣ бетона поры, заполняемыя воздухомъ. Это обстоятельство уменьшаетъ теплопроводность и теплоемкость бетона.

Съ уменьшеніемъ этихъ коэффициентовъ температура внутри бетоннаго массива должна была бы подняться, а вмѣстѣ съ этимъ возрасла бы и интенсивность реакціи, но нѣкоторое количество тепла расходуется на подъемъ температуры имѣющейся въ наличности воды. Это количество значительно вслѣдствіе большой теплоемкости воды.

На ряду съ этими процессами происходитъ испареніе свободной воды съ наружныхъ поверхностей, а затѣмъ и изъ ядра бетоннаго массива. Это обстоятельство сопровождается

положеніемъ теплоты изъ массива и увеличеніемъ пористости бетона. Съ увеличеніемъ пористости уменьшается теплопроводность бетона.

Съ нѣкоторымъ довольно грубымъ приближеніемъ во все таки, мы полагаемъ, достаточнымъ для цѣлей практики, задачу рѣшить можно. Въ разсматриваемомъ опытѣ можно опредѣлить для каждаго дня количество теплоты, находившейся въ массивѣ. Считая теплоемкость бетона 0,154 и вѣсъ одного кубическаго метра, при гранитномъ щебнѣ, 2400 килогр., получимъ количество теплоты, выдѣленной цементомъ и имѣвшемся въ данный день въ наличности  $B = 1,524 \times 2400 \times 0,154 (T-t) = 563,27 (T-t)$  калорій, а на 1 килогр. цемента:  $B_{1 \text{ кил.}} = 563,27 (T-t) : 340 = 1,66 (T-t)$ .

Съ перваго же дня, какъ только температура массива поднимается выше температуры наружной среды, начинается процессъ охлажденія. Мы будемъ считать, что въ теченіе каждыхъ сутокъ разность температуръ была величиной постоянной. Въ этомъ предположеніи въ таблицѣ № 28 въ 6-мъ столбцѣ вычислены для каждаго дня потери теплоты на охлажденіе въ часъ по формулѣ  $W = 2 K (T-t)$ ; въ 7-мъ столбцѣ эта потеря отнесена къ 1 килограмму цемента. Величина  $q$  есть то среднее количество теплоты, отнесенное къ одному килограмму, которое теряетъ массивъ въ часъ и которое компенсируется выдѣленіемъ теплоты при реакціяхъ того же килограмма цемента съ водой, такъ какъ разность температуръ въ теченіе дня постоянна.

Такимъ образомъ для каждаго дня можно опредѣлить то количество теплоты, которое имѣется въ наличности на данный день въ твердѣющемъ массивѣ на 1 килогр. цемента, включая сюда и суточную потерю на охлажденіе  $24 q$ .

$Q_{1 \text{ кил.}} = B_{1 \text{ кил.}} + 24 q = 1,66 (T-t) + 24 q$ . По этой формулѣ сдѣланы вычисления  $Q_{1 \text{ кил.}}$  для каждаго дня и помѣщены въ 8 столбцѣ таблицы № 28.

Можно приблизительно подсчитать все количество теплоты, которое можетъ выдѣлить 1 килогр. цемента. Для этого воспользуемся данными термохиміи.

$\text{Ca O} + \text{H}_2 \text{O}$  при соединеніи выдѣляютъ + 15,1<sup>1)</sup> калорій, имѣя 74 граммъ-молекулъ.  $\text{Ca O}$  имѣетъ 56 граммъ-молекулъ. Такимъ образомъ 56 граммовъ  $\text{Ca O}$  съ соответственнымъ количествомъ воды выдѣляютъ 15,1 большихъ калорій теплоты. По даннымъ анализовъ Кандло, произведенныхъ надъ 45 цементами различныхъ странъ, количество извести въ цементѣ опредѣлилось въ среднемъ 62,71%.

Примемъ для расчета 60%  $\text{Ca O}$ .

Считая, что все количество теплоты въ цементѣ получается исключительно отъ  $\text{Ca O}$ , получимъ слѣдующій результатъ.

Въ 1 килогр. цемента — 600 граммовъ  $\text{Ca O}$  (60%). Полное количество теплоты, которое можетъ выдѣлить 1 килогр. цемента.

$$B_{1 \text{ кил.}} = \frac{15,1 \times 600}{56} = 162 \text{ калорій.}$$

Изъ 8 столбца таблицы видно, что количество теплоты, выдѣлившейся въ 1-й день при химическихъ процессахъ равно 11,51 калорій (большихъ) на 1 килограммъ цемента; округляя примемъ 12 калорій въ первые 12 часовъ, т. е. 1 калорію на килограммъ цемента въ часъ.

Какъ видно изъ той же таблицы въ слѣдующіе три дня въ массивѣ наблюдался подъемъ температуры. Подсчитывая приращеніе теплоты можно принять для слѣдующихъ 24 часовъ 0,2 калоріи на килограммъ цемента въ часъ.

Для слѣдующихъ дней до 10 дня можно принять 0,10 калорій въ часъ на 1 килогр. цемента.

Съ 10-го дня по 20-й — 0,07 калорій въ часъ на 1 кил. цемента и т. д., т. е. принимаемъ то количество теплоты цемента, которое въ данномъ случаѣ выдѣлялось однимъ килограммомъ цемента для компенсаціи потери на охлажденіе.

Данныя помѣщены въ 7 столбцѣ.

1) Федотьевъ. Физико-химическія таблицы. Петербургъ 1901 стр. 228 табл. 260.

### Температура составных частей бетона.

Определение количества теплоты, которое необходимо дать извне твердющему бетонному массиву, сводится къ определению той температуры составных частей бетона — воды, щебня и песку — до которой необходимо нагрѣть эти материалы, чтобы получить надлежащую температуру сырого бетона. Терминомъ «сырой бетонъ» опредѣляется приготовленная механическимъ или ручнымъ способомъ бетонная масса до ея утрамбовки. Въ физикѣ въ ученіи о теплотѣ основательно изученъ случай установившагося распространения теплоты, когда каждая часть тѣла постоянно получаетъ столько же тепла, сколько и теряетъ, при чемъ температура его остается постоянной. Для этого случая выведены формулы, которыми обычно пользуются при расчетахъ отопления и вентиляции.

Въ разсматриваемомъ нами случаѣ температура тѣла понижается, распространение теплоты происходитъ при переменныхъ условіяхъ, трудно поддающихся математическому анализу. Формулы, выведенныя для случая установившагося распространения теплоты, въ данномъ случаѣ не применимы. Для того, чтобы въ дальнѣйшемъ воспользоваться этими формулами, мы сдѣлаемъ такое допущеніе: мы предположимъ, что въ охлаждающемся бетонномъ массивѣ температура мѣняется не непрерывно, а скачками, оставаясь постоянной въ теченіе одного часа; въ концѣ часа температура дѣлаетъ скачекъ въ сторону уменьшенія и затѣмъ опять остается постоянной до слѣдующаго часа. При такомъ предположеніи всѣ формулы, выведенныя для установившагося распространения теплоты, будутъ умістны для каждаго промежутка въ 1 часъ.

Исходя изъ періода времени года, въ который предполагается производить работы, и климатическихъ условій даннаго мѣста, можно напередъ опредѣлить некоторую среднюю температуру ожидаемаго въ періодъ схватыванія мороза. Напримеръ, для Бѣва можно взять  $t = -10^{\circ} C$

Зная толщину досокъ формъ и коэффициенты теплопроводности дерева, мѣшковъ и т. д., можно опредѣлить всеобщіе коэффициенты передачи тепла: 1) черезъ боковыя и нижнюю поверхности и 2) черезъ верхнюю поверхность массива.

Дальше можно опредѣлить полную потерю массивомъ теплоты въ часъ въ функціи отъ разности температуръ: наружной  $t$  и поверхности бетона  $T$ .

$$W = (FK + F_1 K_1)(T - t) = A(T - t), \text{ гдѣ коэффициентъ } A = FK + F_1 K_1$$

Зная:  $V$  — объемъ бетоннаго массива, въсь 1 кубическаго метра, бетона  $\gamma$ , теплоемкость бетона  $\alpha$ , можемъ опредѣлить количество теплоты  $Q$  въ бетонномъ массивѣ въ функціи отъ  $T$

$$Q = V\alpha\gamma T = B T, \text{ гдѣ коэффициентъ } B = V\alpha\gamma.$$

Для подсчета можно принять, что во всей средѣ твердѣющаго бетоннаго массива температура такова же, какъ и на поверхности бетона; это положеніе въ железобетонныхъ сооруженіяхъ особенно можно допустить въ виду наличности железа, которое, благодаря большой теплопроводности, регулируетъ равномерность теплоты. Количество теплоты, выделяемой внутреннимъ источникомъ теплоты въ массивѣ въ каждый изъ первыхъ 12 часовъ —  $C$ , въ каждый изъ слѣдующихъ 24 часовъ —  $C_1$ . Слѣдовательно  $C$  равно числу килограммовъ цемента въ массивѣ.  $C_1 = 0,20$  калорій, умнож. на число килограммовъ цемента въ массивѣ. Полное количество теплоты въ массивѣ въ началѣ каждаго часа назовемъ  $nQ_n$ .

Полное количество теплоты въ массивѣ въ концѣ каждаго часа, безъ вычета на охлажденіе, назовемъ  $kQ_n$ .

Количество теплоты, потерянной массивомъ на охлажденіе въ теченіе каждаго часа, назовемъ  $W_n$ . Обозначимъ  $B - A = m$ ; откуда  $B - m = A$ .

Температуру бетонного массива въ началѣ каждаго часа назовемъ  $T_n^0$ ; начальную  $T^0$ .  ${}_{n}Q_n$ ,  $T_n$ ,  ${}_{k}Q_n$  и  $W_n$  опредѣляются по слѣдующимъ формуламъ.

Для первыхъ 12 часовъ.

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + t + \frac{C}{A} \dots (I); \quad W_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ A(T - t) - C \right] + C \dots (II);$$

$${}_{n}Q_n = B T_n \dots (III); \quad {}_{k}Q_n = B T_n + C \dots (IV);$$

Для слѣдующихъ 24 час., начиная съ 13-го часа.

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + \left(\frac{m}{B}\right)^{n-12} \left[ \frac{C - C_1}{A} \right] + t + \frac{C_1}{A} \dots (V);$$

${}_{n}Q_n$  и  ${}_{k}Q_n$  опредѣляются по формуламъ (III) и (IV)

Формула для опредѣленія температуры сырого бетона  $T$  въ зависимости отъ температуры наружной среды  $t$  (мороза) будетъ такая:

$$T = \left(\frac{C}{A} + t\right) - \left(\frac{B}{m}\right)^{12} \left[ \frac{C - C_1}{A} \right] - \left(\frac{B}{m}\right)^{n-1} \left[ \frac{C_1}{A} \right] \dots (VI).$$

### Выводы формулъ.

${}_{n}Q_n$ . Въ началѣ 1-го часа количество теплоты въ массивѣ равно  ${}_{n}Q_1 = BT$ . Къ концу 1-го часа массивъ приобрѣлъ  $C$  калорій и потерялъ  $W_1 = A(T - t)$ . Въ началѣ 2-го часа  ${}_{n}Q_2 = {}_{n}Q_1 - W_1 + C = BT - A(T - t) + C$ ;  ${}_{n}Q_2 = (B - A)T + At + C \dots (a)$ .

Температура въ началѣ 2-го часа  $T_2 = \frac{{}_{n}Q_2}{B} = \frac{(B - A)T + At + C}{B} \dots (b)$ .

Потеря теплоты массивомъ къ концу 2-го часа  $W_2 = A(T_2 - t) = A \left[ \frac{(B - A)T + At + C}{B} - t \right]$

$$W_2 = \frac{A(B - A)(T - t) + C[B - (B - A)]}{B} \dots (c)$$

Запасъ теплоты къ концу 2-го часа  ${}_{k}Q_2 = {}_{n}Q_2 + C = (B - A)T + At + 2C \dots (d)$ .

Разсуждая такимъ же образомъ, получимъ для 3-го часа

$${}_{n}Q_3 = \frac{(B - A)^2 T + [B^2 - (B - A)^2]t + \left[ \frac{B^2 - (B - A)^2}{B - (B - A)} \right] C}{B} \dots (a_1);$$

$$T_3 = \frac{(B - A)^2 T + [B^2 - (B - A)^2]t + \left[ \frac{B^2 - (B - A)^2}{B - (B - A)} \right] C}{B^2} \dots (b_1)$$

$$W_3 = \frac{A(B - A)^2(T - t) + C[B^2 - (B - A)^2]}{B^2} \dots (c_1);$$

$${}_{k}Q_3 = \frac{(B - A)^2 T + [B^2 - (B - A)^2]t + (3B - A)C}{B} \dots (d_1)$$

Для 4-го часа будемъ имѣть соответственно

$${}_{n}Q_4 = \frac{(B - A)^3 T + [B^3 - (B - A)^3]t + C \left[ \frac{B^3 - (B - A)^3}{B - (B - A)} \right]}{B^2} \dots (a_2);$$

$$T_4 = \frac{(B - A)^3 T + [B^3 - (B - A)^3]t + \left[ \frac{B^3 - (B - A)^3}{B - (B - A)} \right] C}{B^3} \dots (b_2)$$

$$W_4 = \frac{A(B - A)^3(T - t) + C[B^3 - (B - A)^3]}{B^3} \dots (c_2)$$



Обозначая  $B - A = m$ , подмѣчая законъ образования и выводъ за скобки степенные члены, напишемъ общія формулы въ такомъ видѣ

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + t + \frac{C}{A}; \quad W_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ A(T-t) - C \right] + C.$$

Эти формулы вѣрны для первыхъ 12 часовъ, пока постоянно  $C$ . Съ 13-го часа вмѣсто  $C$  будетъ  $C_1$ . Для 13-го и слѣдующихъ часовъ по 36-й включительно, мы можемъ построить формулы, разсуждая такимъ образомъ.

Опредѣляемъ температуру въ концѣ 12-го часа, иначе говоря въ началѣ 13-го  $T_{13}$ , по формулѣ (I)

$$T_{13} = \left(\frac{m}{B}\right)^{12} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + t + \frac{C}{A}.$$

Затѣмъ, принимая 13-й членъ за 1-й и вставляя  $C_1$  вмѣсто  $C$ , можемъ написать выраженіе для любого члена  $n$ , большаго 12, по формулѣ (I)

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{(n-12)-1} \left[ T_{13} - t - \frac{C_1}{A} \right] + t + \frac{C_1}{A}$$

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-13} T_{13} - \left(\frac{m}{B}\right)^{n-13} \left[ t + \frac{C_1}{A} \right] + t + \frac{C_1}{A}$$

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-13} \left\{ \left(\frac{m}{B}\right)^{12} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + t + \frac{C}{A} \right\} - \left(\frac{m}{B}\right)^{n-13} \left[ t + \frac{C_1}{A} \right] + t + \frac{C_1}{A}.$$

Послѣ приведенія подобныхъ членовъ получаемъ

$$T_n = \left(\frac{m}{B}\right)^{n-1} \left[ T - t - \frac{C}{A} \right] + \left(\frac{m}{B}\right)^{n-12} \left[ \frac{C - C_1}{A} \right] + t + \frac{C_1}{A}.$$

Формулу для опредѣленія  $T$  мы выводимъ изъ слѣдующихъ соображеній. Если мы желаемъ дать твердѣющему массиву такой запасъ теплоты, чтобы его было достаточно для поддержанія температуры выше нуля градусовъ въ теченіе  $(n-1)$  часовъ, то, очевидно, въ началѣ  $n$  — таго часа температура будетъ равна нулю. Слѣдовательно для опредѣленія  $T$  мы приравниваемъ нулю  $T_n$  въ формулѣ (V), и изъ уравненія опредѣляемъ  $T$ . Послѣ приведенія подобныхъ членовъ получаемъ формулу (VI).

Когда температура  $T$  сырого бетона опредѣлена, можно опредѣлить температуру воды, щебня и (если нужно) песку на бетонномъ заводѣ. Температура  $\mathcal{T}$  частей составныхъ частей бетона, въ зависимости отъ разстоянія бетоннаго завода до мѣста работъ, температуры воздуха на бетонномъ заводѣ и температуры снаружи, можетъ быть принята на  $a^0$  выше  $T$ ;  $a^0$  — можно принять равнымъ  $3^0 - 5^0$ .

Опредѣляется  $a^0$  эмпирически, измѣряя температуру въ сооруженіи; если показанія термометра меньше  $T$ , то матеріалы нужно нагрѣть больше. Итакъ  $\mathcal{T} = T +$  (отъ  $3^0$  до  $5^0$ ).

При доставкѣ бетона изъ бетоннаго завода на сооруженіе слѣдуетъ примѣнять мѣры для предохраненія сырого бетона отъ охлажденія. Нами при подачѣ бетона принимались слѣдующія мѣры. Бетонная масса доставлялась въ специально сдѣланныхъ для этого тачкахъ, обитыхъ изнутри войлокомъ или полотномъ. Сверху тачки закрывались плотно пригнанными крышками, также обитыми войлокомъ. Кромѣ этого бетонъ укрывался мѣшками. Тачки и крышки дѣлались изъ досокъ толщиною 2 дюйма.

Температуры воды, щебня и песку опредѣляемъ слѣдующимъ образомъ. Подсчитываемъ указаннымъ выше способомъ количество составныхъ частей въ 1 кубич. метрѣ утрамбованнаго бетона.

Назовемъ эти количества начальными буквами ихъ наименованій: Песокъ—П кил., щебень—Щ кил., вода—В кил., цементъ—Ц; искомыя температуры песку, щебня и воды обозначимъ соответственно  $t_n, t_m, t_v$ , температуру цемента — черезъ  $t_c$ . Теплоемкости матеріаловъ обозначимъ черезъ  $q$  съ тѣми же значками. Составляемъ уравненіе

$$Vq_v t_v + \text{Щ}q_m t_m + \text{П}q_n t_n + \text{Ц}q_c t_c = [Vq_v + \text{Щ}q_m + \text{П}q_n + \text{Ц}q_c] \mathcal{T} \dots \text{(VII)}$$

Зная температуру цемента (обычно отрицательная или 0) и задаваясь  $t_m$  и  $t_n$ , опредѣляемъ температуру воды. Температуры слѣдуетъ подбирать такъ, чтобы наибольшая была для воды, затѣмъ для щебня, и еще ниже для песка, соответственно величинѣ ихъ

теплоемкостей. Вообще говоря воду слѣдуетъ нагрѣвать выше щепня градусовъ на 10—15, такъ какъ теплоемкость воды велика, то щепень и песокъ приходится нагрѣвать до  $20^{\circ}$ — $30^{\circ}$ , для полученія требуемаго количества калорій. Количество воды слѣдуетъ брать для каждаго цемента по его нормальному тѣсту, т. е.  $18^{\circ}/_{100}$  до  $33^{\circ}/_{100}$  по вѣсу отъ вѣса цемента, въ зависимости отъ сорта цемента съ добавкой на смачиваніе песку.

При заданной температурѣ мороза надо стремиться къ наименьшему нагрѣванію матеріаловъ. Для этого, если по формуламъ получились высокія температуры, то можно принять слѣдующія мѣры. Формы дѣлать изъ болѣе толстыхъ досокъ 2",  $2\frac{1}{2}$ ". Верхнюю поверхность моста, свободную отъ формъ, покрывать мѣшками, войлокомъ и прочими изоляторами, сверху толстыми досками и затѣмъ слоемъ навоза. Если и этого мало, то формы обивать тканью, войлокомъ, толемъ и т. д.

Мы указываемъ на эти предосторожности, имѣя въ виду, что всѣ новшества встрѣчаются нашими строителями съ недовѣріемъ и каждый, подсчитавъ по формуламъ температуры, добавитъ къ нимъ безъ расчета, таковъ уже обычай, еще чтонибудь на всякій случай.

**Примѣръ.** Примѣнимъ выведенныя нами формулы къ опредѣленію температуры сырого бетона  $T$  для приводимаго ниже неразрѣзного балочнаго моста. Условия работъ и ихъ производство приведены ниже. Для расчета взята температура мороза  $t = -10^{\circ}$ . Объемъ бетонной кладки моста 26 куб. метровъ.

Верхняя поверхность моста (предполагается прикрывать мѣшками, досками  $1\frac{1}{2}$ " и навозомъ)  $F = 100$  кв. метр. Боковая и нижняя поверхность моста  $F_1 = 162$  кв. метр. Коэффициентъ потери теплоты черезъ лучеиспусканіе и соприкосновеніе съ воздухомъ  $Q$  опредѣленъ выше (стр. 88)  $Q = 9,73$  калор.

Всеобщій коэффициентъ передачи тепла черезъ верхнюю поверхность, считая коэффициентъ  $S$  въ формулѣ Пекле для мѣшковъ равнымъ 3,6 и не вводя въ расчетъ слой навоза

$$K = \frac{1}{\frac{1}{Q} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{9,73} + \frac{0,001}{0,043} + \frac{0,038}{0,093}} = 1,87.$$

Всеобщій коэффициентъ передачи тепла черезъ боковыя и нижнюю поверхность

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{Q} + \frac{e}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{9,73} + \frac{0,038}{0,093}} = 1,95.$$

Полная потеря теплоты въ часъ массивомъ моста

$$W = (FK + F_1K_1)(T - t) = (100 \cdot 1,87 + 162 \cdot 1,95)(T - t) = 503(T - t).$$

$$W = A(T - t).$$

Значенія буквъ въ формулахъ.

$e$ —толщина доски  $= 1\frac{1}{2}$ "  $= 0,038$  метр.;  $\lambda$ —коэфф. теплопроводности для сосны поперекъ волоконъ;  $e_1$ —толщина мѣшка  $= 1$  милл.  $= 0,001$  метр.;  $\lambda_1$ —коэфф. теплопроводности для пеньковой старой ткани.

Количество теплоты, необходимой для нагрѣванія массива моста на  $1^{\circ}$ .

$$B = Va\gamma. \quad B = 26 \cdot 2400 \cdot 0,154 = 2609;$$

Опредѣлимъ коэффициенты  $C$  и  $C_1$ .

Составъ бетона 1 : 2 : 3.

1 литръ цемента +  $29^{\circ}/_{100}$  воды дають 0,813 литровъ тверд. массы.

1 литръ мелкаго песку ( $30^{\circ}/_{100}$  пустотъ) +  $15^{\circ}/_{100}$  даетъ 0,345 литровъ пустотъ.

2 литра » » » » » 0,690 » » »

1 литръ цемента + 2 литра песку дають:  $0,813 + 2 - 0,690 = 2,123$  литра тверд. массы.



Такимъ образомъ вопросъ о бетонныхъ работахъ при низкихъ температурахъ свелся къ нагрѣванію матеріаловъ, входящихъ въ составъ бетона. Чѣмъ ниже температура атмосферы (чѣмъ больше морозъ), тѣмъ очевидно, больше нужно нагрѣвать матеріалы. Слѣдовательно наиболѣе низкая температура атмосферы, допустимая при бетонныхъ работахъ, зависитъ отъ той наиболѣе высокой температуры, до которой можно нагрѣть матеріалы безъ ущерба для процессовъ схватыванія и тверднѣнія, а слѣдовательно и для прочности бетона. Въ § 14 нами подробно разсмотрѣнъ вопросъ о вліяніи температуры воды на прочность цементныхъ растворовъ и приведены установившіеся въ теоріи и практикѣ взгляды по этому поводу.

Для выясненія максимальной допустимой температуры матеріаловъ, входящихъ въ составъ бетона, нами произведенъ рядъ опытовъ, результаты которыхъ изложены въ слѣдующей главѣ.

Итакъ рѣшеніе задачи о бетонныхъ работахъ на морозѣ можетъ быть, въ общемъ случаѣ, приведено къ слѣдующимъ принципамъ.

Главнымъ препятствіемъ для работъ на морозѣ служитъ замерзаніе воды при 0° Цельсія.

Для осуществленія бетонныхъ работъ на морозѣ съ этимъ препятствіемъ можно бороться однимъ изъ слѣдующихъ способовъ.

1) Изолировать строящееся сооруженіе отъ вліянія мороза, какъ во время работъ, такъ и въ періодъ тверднѣнія. Воплощеніемъ этой идеи въ жизнь являются: тепляки, формы изъ двойныхъ рядовъ досокъ съ воздушными прослойками; температура въ которыхъ поддерживается на извѣстной высотѣ при помощи центрального отопленія, или другими способами.

Недостатки этихъ способовъ очевидны.

Дороговизна постройки тепляковъ, неувѣренность въ поддержаніи требуемой температуры въ періодъ тверднѣнія, особенно ночью. При неаккуратности и небрежности рабочихъ, тепляки ночью охлаждаются до—5° и даже—10°, что нами лично наблюдалось на работахъ. Слишкомъ большой періодъ функціонированія тепляка, влечетъ за собой какъ большой расходъ топлива, такъ и рабочихъ силъ и технического надзора и проч.

2) Понизить температуру замерзанія воды и такимъ образомъ увеличить періодъ работъ при низкихъ температурахъ.

Для пониженія температуры замерзанія воды на практикѣ примѣняется обыкновенно поваренная соль. Кромѣ поваренной соли примѣняются: хлористый кальцій, сода, алкоголь, сахаръ, глицеринъ и т. д. Всѣ эти вещества, растворяясь въ водѣ, понижаютъ на извѣстное число градусовъ температуру замерзанія воды—обыкновенно до—5° и даже до—10° С. Но примѣненіе этихъ веществъ допустимо только до нѣкотораго предѣла, ограничиваемаго тѣмъ обстоятельствомъ, что дальнѣйшая концентрація раствора вредно отражается на скорости схватыванія и на прочности бетона. Въ главѣ IX мы указывали, что примѣненіе всякихъ веществъ вообще вредно для прочности бетона, такъ какъ при замерзаніи раствора вымерзаетъ прежде всего вода, а растворъ концентрируется.

3) Обойти точку замерзанія воды такимъ образомъ, чтобы успѣлъ произойти полный процессъ схватыванія прежде, чѣмъ какая-нибудь часть массива достигнетъ температуры 0°. Этотъ способъ, какъ наиболѣе рациональный съ технической и экономической точки зрѣнія, и принять нами, послѣ цѣлаго ряда лѣтъ опытовъ въ разныхъ направленіяхъ.

## ГЛАВА XI. Лабораторные опыты надъ цементнымъ растворомъ съ подогрѣтыми матеріалами.

### § 38. Характеристика цементовъ, взятыхъ для опытовъ.

Опыты производились съ цементами двухъ заводовъ: „Пушка“ (ст. Краматорская) и „Скала“ (Авдаръ въ Новороссійскѣ).

Оба сорта испытаны въ Лабораторіи технологіи строительныхъ матеріаловъ Киевскаго Политехническаго Института завѣдывающимъ лабораторіей (см. табл. № 29 и № 30).

#### Портландъ-цементъ „Пушка“.

1. Измоль цемента: остатокъ на ситѣ въ 900 отв. на см.<sup>2</sup> — 1%  
прошло черезъ сито въ 4900 „ „ — 82%
2. Начало схватыванія: черезъ 2 ч. 30 мин.
3. Срокъ схватыванія: черезъ 4 ч. 40 мин.  
воды 24%
4. Цвѣтъ цемента: сѣрый.
5. Постоянство объема: а) пробу плиткой нагрѣваніемъ  
б) „ „ въ водѣ  
в) „ „ кипяченіемъ
7. Удѣльный вѣсъ — 3,17 (изъ 2-хъ опредѣленій).

ТАБЛИЦА № 29.

8. Испытаніе на разрывъ.  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе.  
(Площадь дробленія 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 части цемента и 3 частей норм. песку. Воды 7,5%	1	18,5	25,00
	2	21,00	24,60
	3	14,00	25,40
	4	20,80	23,00
	5	16,50	26,20
	6	22,50	21,80
Среднее изъ 4-хъ большихъ		20,70	25,30
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 24%	1	35,00	41,00
	2	41,20	54,00
	3	34,40	47,00
	4	38,00	47,40
	5	36,00	41,00
	6	37,00	41,00
Среднее изъ 4-хъ большихъ		38,05	47,35

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія
		28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 час. цемента и 3 ч. песку. Воды 7,5%	1	265
	2	180
	3	235
	4	—
	5	—
	6	—
Среднее изъ 2-хъ большихъ		250
Отношеніе R' : R"		99

Портландъ цементъ „Скала“.

1. Измоль цемента: остатокъ на ситѣ въ 900 отв. на см.<sup>2</sup>—0,8<sub>0</sub><sup>0</sup>  
прошло черезъ сито въ 4900 отв. на см.<sup>2</sup>—91<sub>0</sub><sup>0</sup>
2. Начало схватыванія: черезъ 2 часа.
3. Срокъ схватыванія: черезъ 5 час. 30 мин.  
воды 33<sub>0</sub>
4. Цвѣтъ цемента: сѣрый.
5. Постоянство объема: а) пробу плиткой нагрѣваніемъ  
б) " " въ водѣ  
в) " " кипяченіемъ } выдержаль
7. Удельный вѣсъ: 3,122 (изъ двухъ опредѣленій).

ТАБЛИЦА № 30.

8. Испытаніе на разрывѣ.  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе.  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 частей нормального песку. Воды 9%	1	13,8	17,2
	2	14,0	16,2
	3	12,8	18,2
	4	15,2	20,8
	5	11,2	18,0
	6	15,0	17,2
Среднее изъ 4-хъ большихъ		14,5	18,55
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 33%	1	19,4	31,8
	2	23,0	14,0
	3	26,0	30,0
	4	31,0	34,4
	5	31,6	35,0
	6	29,0	34,0
Среднее изъ 4 хъ большихъ		29,4	33,8

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія 28 дней кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3-хъ частей нормального песку. Воды 9%	1	190
	2	176
	3	186
	4	—
	5	—
	6	—
Среднее изъ 2-хъ большихъ		188
Отношеніе R'' : R'		10

§ 39. Опыты съ подогрѣтыми матеріалами.

При испытаніи цементныхъ растворовъ въ лабораторіяхъ примѣняется нормальный песокъ. Нами при опытахъ съ подогрѣтыми матеріалами примѣнялся песокъ, или употреблявшійся для цементнаго раствора и бетона на строившихся нами сооруженіяхъ, или полученный изъ другихъ карьеровъ.

Опыты съ цементомъ „Пушка“.

1. Температура цемента, воды, песку, воздуха  $t = 16^{\circ} \text{C}$ .

а) Растворъ изъ чистаго цемента.

Воды взято 36%. Послѣ затворенія и перемѣшиванія въ теченіе 5 минутъ температура раствора  $t = 18^{\circ}$ , т. е. поднялась на  $2^{\circ}$ . Слѣдъ отъ ногтя пересталъ заплывать черезъ 55 м. Тѣсто получилось жиже нормальнаго.

ТАБЛИЦА № 31.

Испытаніе на разрывъ  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора	№ № опыта	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней. кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 36%.	1	42,99	34,81
	2	20,47	46,70
	3	36,85	42,25
	4	32,50	34,50
Среднее		33,20	39,56
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3-хъ частей песку. Воды 10%.	1	7,17	9,21
	2	9,21	12,28
	3	8,19	9,20
	4	8,17	11,30
Среднее		8,18	10,5

Составъ раствора	№ № опыта	Срокъ испытанія 28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>	
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 36%.	1		
	2		
	3		
	4		
Среднее			
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 частей песку. Воды 10%.	1	72	
	2	62	
	3	58	
	4	64	
Среднее		64	
Отношеніе R': R			6,1

б) Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песку. Тѣсто получилось сухое. Песокъ мелкій. Данные опытовъ приведены въ таблицѣ № 31.

2. Вода нагрѣта до кипѣнія. Остальные матеріалы при обыкновенной температурѣ.

а) Растворъ изъ чистаго цемента.

Температура воды  $t = 98,50^{\circ} \text{C}$ . Температура цемента и воздуха  $t = 16^{\circ}$ . Воды взято 40%.

Вода кипѣла въ теченіе 7 мин; кипящая взята въ цилиндръ и взята въ цементъ. Тѣсто перемѣшивалось въ теченіе 5 минутъ. Послѣ 5 мин. перемѣшиванія температура тѣста  $t = 50^{\circ}$ ; къ концу опыта (набивка кубиковъ) температура тѣста  $t = 37$ . Тѣсто въ началѣ очень густое: происходитъ быстрое впитываніе воды и какъ бы схватываніе раствора. Но, по мѣрѣ перемѣшиванія, тѣсто дѣлается рѣже и пластичнѣе. Черезъ часъ послѣ затворенія температура тѣста  $t = 23^{\circ}$ . Слѣдъ отъ ногтя пересталъ заплывать черезъ 50 мин. послѣ затворенія.

б) Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песку (песокъ мелкій). Температура воды  $t = 100^{\circ}$  С. Температура цемента, песку и воздуха  $t = 19^{\circ}$ . Воды взято 10%. Вода кипѣла въ теченіе 5 мин. Кипящая вода взята въ цилиндръ и влита въ перемѣшанный насухо цементъ съ пескомъ. Послѣ 5 мин. перемѣшиванія температура тѣста  $t = 32^{\circ}$ . Тѣсто получилось сухое.

ТАБЛИЦА № 32.

Испытаніе на разрывъ.  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>).

Испытаніе на раздробленіе.  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>).

Составъ раствора.	№ № опыта.	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup> .	28 дней кил. на см. <sup>2</sup> .
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 40%.	1	36,56	45,75
	2	39,56	44,75
	3	33,76	44,85
	4	35,26	45,25
	5	38,36	45,30
	6	44,26	44,90
Среднее . . .		37,96	45,13
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песку. Воды 10%.	1	7,4	8,19
	2	6,0	10,24
	3	8,0	10,24
	4	7,4	8,19
	5	8,0	7,56
	6	7,5	9,19
Среднее . . .		7,38	8,93

Составъ раствора.	№ № опыта.	Срокъ испытанія черезъ	
		28 дней кил. на см. <sup>2</sup> .	
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 40%.	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
Среднее . . .			
Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 част. песку. Воды 10%.	1	52	
	2	68	
	3	60	
	4	62	
Среднее . . .		60,5	
Отношеніе R'. R''.		6,8	

Черезъ 24 часа послѣ затворенія кубики и восьмерки положены въ воду. На 3-й день на восьмеркахъ, на верхней и нижней плоскостяхъ, по краямъ появилась ясно видимая кайма. Кайма болѣе свѣтлаго цвѣта, чѣмъ ядро восьмерки; ширина каймы отъ 2-хъ до 4-хъ миллиметровъ. Данныя опытовъ приведены въ таблицѣ № 32.

**Опыты съ цементомъ „Скала“.**

1. Температура цемента, воды, песку и воздуха  $t = 20,5^{\circ}$ С.

а) Растворъ изъ чистаго цемента.

Воды взято 33%. Послѣ затворенія и перемѣшиванія въ теченіи 5 мин. температура тѣста поднялась на  $t = 2,5^{\circ}$ . Тѣсто получилось нормальной густоты.



ТАБЛИЦА № 33.

Испытаніе на разрывъ  
(Площадь вазрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора	№ № опыта	Срокъ испытанія черезъ		Составъ раствора	№ № опыта	Срокъ испытанія черезъ 28 дней кил. на см. <sup>2</sup>
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней кил. на см. <sup>2</sup>			
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 33%	1	27,57	34,80	Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 33%	1	300
	2	28,47	33,78		2	
	3	25,27	34,29		3	
	4	27,10	34,80		4	
	5	28,20	33,50		5	
	6	26,00	34,57		6	
Среднее		27,10	34,29	Среднее		300
Растворъ изъ 1 части цемента и 3 ч. песку. Воды 10%	1	11,78	14,33	Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 част. песку. Воды 10%	1	65
	2	10,28	14,33		2	
	3	12,28	16,38		3	
	4	11,45	14,80		4	
	5	12,15	15,65		5	
	6	10,75	14,95		6	
Среднее		11,44	15,13	Среднее		65

б) Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песку. Консистенція тѣста нормальная. Для опыта былъ взятъ мелкій песокъ. Данныя опытовъ приведены въ таблицѣ № 33.

2. Вода нагрѣта до кипѣнія. Остальные матеріалы взяты при обыкновенной температурѣ.

Растворъ изъ чистаго цемента.

Температура воды  $t = 99^{\circ}$  С. Температура цемента и воздуха  $t = 16^{\circ}$ . Воды взято 33%. Вода кипѣла въ теченіе 7 мин. Кипищая влита въ цилиндръ и затѣмъ въ цементъ. Тѣсто перемѣшивалось въ теченіе 5 мин. Температура тѣста послѣ перемѣшиванія  $t = 46^{\circ}$ .

Наблюдалось такое же впитываніе цементомъ воды при затвореніи и потомъ постепенная отдача ея при перемѣшиваніи, какъ и въ цементъ „Пушка“. Пластичность тѣста такая же, какъ и при холодной водѣ. Данныя опытовъ приведены въ таблицѣ № 34.

3. Вода и песокъ горячіе.

Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 частей песку.

Температура воды  $t = 99^{\circ}$  С. Температура песку  $t = 100^{\circ}$ . Температура цемента и воздуха  $t = 16^{\circ}$ . Воды взято 11%.

ТАБЛИЦА № 34.

Испытаніе на разрывъ  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе  
(Площадь давл. 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней. кил. на см. <sup>2</sup>	29 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 33%	1	27,57	25,59
	2	26,07	29,69
	3	27,57	37,88
	4	27,65	33,78
	5	27,90	34,50
	6	26,97	37,80
Среднее		27,40	33,20

Составъ раствора	№№ опыта	Срокъ испытанія черезъ
		28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ чи- стаго це- мента. Воды 33%	1	220
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
Среднее		220

Горячій песокъ положенъ въ котелокъ. Добавленъ цементъ, и смѣсь перемѣшана до полученія однороднаго цвѣта. Вода, кипѣвшая 5 мин., прилита къ смѣси цемента съ пескомъ.

Послѣ перемѣшиванія, продолжавшагося 5 мин., температура раствора  $t = 50^{\circ}$ .

Растворъ получился нормальной густоты. Данныя опытовъ приведены въ таб. № 35.

ТАБЛИЦА № 35.

Испытаніе на разрывъ.  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Испытаніе на раздробленіе.  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора.	№№ опыта.	Срокъ испытанія черезъ.	
		7 дней. кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 части цемента и 3 част. песку. Воды 11%.	1	10,24	11,26
	2	7,93	10,24
	3	6,14	10,24
	4	8,12	11,15
	5	7,80	10,45
	6	8,40	10,20
Среднее . . . . .		8,10	10,59

Составъ раствора.	№№ опыта.	Срокъ испытанія черезъ
		28 дней. кил. на см. <sup>2</sup>
Растворъ изъ 1 ч. це- мента и 3 ч. песку. Воды 11%.	1	88
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
Среднее . . . . .		88
Отношеніе R' : R''.		8,3

4. Цементъ и вода горячіе.

Растворъ изъ чистаго цемента.

Температура воздуха  $t = 16^{\circ}$  С. Температура воды  $36^{\circ}$ . Температура цемента  $90^{\circ}$  С. Воды взято 32%.

Вода была нагрѣта до кипѣнія, но до употребленія въ дѣло успѣла остыть до  $36^{\circ}$ .

При нагрѣваніи цемента до температуры  $t = 90^{\circ}$  выделялся угарный, слегка удушливый газъ. При добавленіи воды къ горячему цементу, получались, при перемѣшиваніи какъ бы взрывы—взлеталъ цементъ и, повидимому, пары воды.

Послѣ перемѣшиванія въ теченіе 5 мин., получилось не тѣсто, а какіе то комки, на подобіе засыхающей послѣ дождя глины. При утрамбовкѣ комки превращались въ пластичное тѣсто во все время работы. Температура раствора, послѣ 5 мин. перемѣшиванія,  $t = 54^{\circ}$ . Данныя опытовъ приведены въ таблицѣ № 36.

ТАБЛИЦА № 36.

Испытаніе на разрывѣ.  
(Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>).

Испытаніе на раздробленіе.  
(Площадь давленія 50 см.<sup>2</sup>).

Составъ раствора.	№ № опыта.	Срокъ испытанія черезъ		Составъ раствора.	№№ опыта.	Срокъ испытанія черезъ 28 дней кил. на см. <sup>2</sup>
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup>	28 дней кил. на см. <sup>2</sup>			
Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 32%.	1	30,71	38,90	Растворъ изъ чистаго цемента. Воды 32%.	1	205
	2	23,55 (рак.)	38,08		2	
	3	25,57	34,81		3	
	4	25,37	38,60		4	
	5	27,10	37,10		5	
	6	27,80	36,15		6	
Среднее . . . . .		26,69	37,27	Среднее . . . . .		205

5. Цементъ, вода и песокъ — горячіе.

Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песку.

Температура воздуха  $t = 17^{\circ}$  С. Температура песку и цемента  $t = 100^{\circ}$ .

Температура воды  $t = 99^{\circ}$ . Воды взято 20%. Цементъ и песокъ нагрѣвались отдѣльно до температуры  $t = 80^{\circ}$ . При температурѣ  $80^{\circ}$  влага въ песокъ исчезла. Послѣ этого цементъ и песокъ были помѣщены въ одномъ сосудѣ и при дальнѣйшемъ нагрѣваніи до  $100^{\circ}$  все время перемѣшивались.

Въ смѣсь цемента съ пескомъ была влита горячая вода. Перемѣшиваніе производилось въ теченіе 5 мин. въ горячемъ сосудѣ. Температура раствора послѣ перемѣшиванія  $t = 74^{\circ}$ .

Консистенція раствора средняя: сжатое въ кулакѣ тѣсто держится въ комкѣ.

Образцы (восьмерки) черезъ 24 часа послѣ изготовленія хранились въ водѣ. Черезъ 7 дней вынуты изъ воды.

Образцы испытанные черезъ 177 дней, хранились на воздухѣ при обыкновенныхъ условіяхъ послѣ 7-дневнаго тверднѣнія подъ водой. Данныя опытовъ приведены въ таблицѣ № 37.

Результаты испытаній при различныхъ условіяхъ собираемъ въ общія таблицы № 38 и № 39 для каждаго изъ сортовъ цемента.

ТАБЛИЦА № 37.

Испытаніе на разрывъ. (Площадь разрыва 5 см.<sup>2</sup>)

Составъ раствора.	№ опыта.	Срокъ испытанія черезъ	
		7 дней кил. на см. <sup>2</sup> .	177 дней кил. на см. <sup>2</sup> .
Растворъ изъ 1 части цемента и 3 частей песку. Воды 20%.	1	2,45	4,10
	2	2,45	6,14
	3	3,70	7,70
	4	3,70	7,18
	5	4,10	4,10
	6	4,50	4,10
	7	3,27	
	8	4,10	
Среднее . . . . .		3,53	5,55

ТАБЛИЦА № 38.

Портландъ-цементъ „Пушка“.

ИСПЫТАНІЕ НА РАЗРЫВЪ.						
Срокъ испытанія.	Растворъ изъ чистаго цемента.			Растворъ изъ 1 ч. цем. и 3 ч. песку.		
	Данныя Ла- бораторіи Политехни- ческаго Ин- ститута. При обыкновен. условіяхъ. <sup>1)</sup>	Вода, це- ментъ, воз- духъ t=16° При обыкно- венныхъ условіяхъ.	Вода горячая t=98,50°.  Цементъ, воздухъ t=16°.	Данныя Ла- бораторіи Политехни- ческаго Ин- ститута. При обыкновен. условіяхъ. <sup>1)</sup>	Вода, це- ментъ, пе- сокъ, воз- духъ t=16°	Вода горячая t=100°.  Цементъ, песокъ воздухъ t=19°.
7 дней . . .	36,93	33,20	37,96	18,88	8,18	7,38
28 дней. . .	45,23	39,56	45,13	24,33	10,5	8,93
ИСПЫТАНІЕ НА РАЗДРОБЛЕНІЕ.						
28 дней. . .				227	64	60,5
Отношеніе R' : R'' . . .				9,35	6,1	6,8

<sup>1)</sup> Данныя лабораторіи Политехническаго Института взяты не среднія изъ 2 или 4-хъ большихъ, а среднія изъ всѣхъ опытовъ.

ТАБЛИЦА № 39.

Портландъ цементъ „Скала“.

ИСПЫТАНИЕ НА РАЗРЫВЪ.													
Срокъ испытанія.	Растворъ изъ чистаго цемента.				Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 ч. песка.								
	Данная Лабораторіи Политехническаго Института. При обыкновен. условіяхъ.	Вода, цементъ, воздухъ $t=20,5$ при обыкновен. условіяхъ.	Вода горячая $t=99^{\circ}$ .	Цементъ, воздухъ $t=16^{\circ}$ .	Вода горячая $t=36^{\circ}$ ; Цементъ горячий $t=90^{\circ}$ .	Воздухъ $t=16^{\circ}$ .	Данная Лабораторіи Политехническаго Института. При обыкновен. условіяхъ.	Вода, цементъ, песокъ, воздухъ $t=20,5^{\circ}$ .	Вода горячая $t=99^{\circ}$ ; Песокъ горячий $t=100^{\circ}$ .	Цементъ, воздухъ $t=16^{\circ}$ .	Вода горячая $t=99^{\circ}$ ; Песокъ горячий $t=100^{\circ}$ .	Цементъ, горячий $t=100^{\circ}$ .	Воздухъ $t=17^{\circ}$ .
7 дней.	26,36 <sup>1)</sup>	27,10	27,40	26,69	13,66 <sup>1)</sup>	11,44	8,10	3,53					
28 дней.	29,87 <sup>1)</sup>	34,28	33,20	37,27	17,93 <sup>1)</sup>	15,13	10,59	5,55					
ИСПЫТАНИЕ НА РАЗДРОБЛЕНІЕ.													
28 дней.		300	220	205	184	65	88						
Отношеніе R' : R''		8,75	6,65	5,5	10,25	4,3	8,3						

ТАБЛИЦА № 40.

Время отъ начала за-творенія мин.	Погруженіе иглы Вика, мм. отъ низа	Температура тѣста, Градусы С.	Время отъ начала за-творенія, часы мин.	Погруженіе иглы Вика, мм. отъ низа	Температура тѣста, Градусы С.	Время отъ начала за-творенія часы, мин.	Погруженіе иглы Вика, отъ низа	Температура тѣста, Градусы С.
10	до дна	31	1 ч. 45 м.	— 3	21	3 ч. 45 м.	38 —	20
15	до дна	27	2 ч. —	— 6	20,75	3 ч. 50 м.	38 (1 мм.)	20
20	до дна	25	2 ч. 15 м.	— 11	20,50	3 ч. 55 м.	38 (1 мм.)	20
25	1/2	24	2 ч. 50 м.	— 24	20	4 ч. —	38,5 (1/2)	20
30	1/2	23,75	3 ч. 10 м.	32	20	4 ч. 5 м.	38,5 (1/2)	20
35	1/2	23,50	3 ч. 20 м.	33	20	4 ч. 10 м.	38,5 (1/2)	20
40	1/2	23	3 ч. 30 м.	34	20	4 ч. 15 м.	38,5 (1/2)	20
45	1	23	3 ч. 35 м.	36	20	4 ч. 20 м.	38,5 (1/2)	20
1 ч. 10 м.	1,5	22	3 ч. 40 м.	37	20	4 ч. 30 м.	38,5 (1/2)	20
							дальше погруж. нуль.	

1) Данная лабораторіи Политехническаго Института взяты не среднія изъ 2-хъ или 4-хъ большихъ, а среднія изъ всѣхъ опытовъ.

6. Опредѣленіе начала и конца схватыванія чистаго цементнаго раствора, затвореннаго горячей водой  $t = 99^{\circ}\text{C}$ .

Воды взято 33% для тѣста нормальной густоты.

Послѣ 5 мин. перемѣшиванія часть тѣста была уложена въ эбонитовую коробку прибора Вика, часть въ другую коробку. Въ послѣднюю вставленъ термометръ для опредѣленія паденія температуры тѣста. Въ прилагаемой таблицѣ № 40 представлено постепенное схватываніе раствора и паденіе температуры. Высота кольцевой коробки 39 мм.

Изъ таблицы № 40 слѣдуетъ: начало схватыванія наступило черезъ 25 минутъ послѣ затворенія; конецъ схватыванія наступилъ черезъ 4 ч. 30 мин. послѣ затворенія.

Срокъ схватыванія, т. е. время, прошедшее отъ начала до конца схватыванія, 4 ч. 5 минутъ.

„Техническія условія пріемки портландъ-цементовъ „М. П. Сообщенія (§ 4) предписываютъ:

„а) Портландъ-цементъ долженъ быть медленно схватывающимся: начало его схватыванія должно наступать не ранѣе 20 минутъ, считая съ момента прибавленія воды къ цементу, а конецъ схватыванія не ранѣе одного часа и не позже 12 часовъ.“

Сопоставляя вышеприведенное предписаніе съ опытомъ, мы приходимъ къ важному выводу: начало и конецъ схватыванія растворовъ изъ чистаго цемента, затворенныхъ горячей водой, удовлетворяютъ техническимъ условіямъ.

Разматривая сводныя таблицы № 38 и № 39 опытовъ надъ цементами „Пушка“ и „Скала“, приходимъ къ слѣдующимъ выводамъ.

А. Растворъ изъ чистаго цемента.

1) Затвореніе горячей водой (до кипѣнія) нисколько не уменьшаетъ прочность цементнаго раствора на разрывъ.

2) Затвореніе горячей водой горячаго цемента нисколько не уменьшаетъ прочность цементнаго раствора на разрывъ.

3) О вліяніи затворенія холоднаго или горячаго цемента на прочность раствора на раздробленіе изъ малочисленныхъ опытовъ судить нельзя; этотъ вопросъ остается открытымъ; единичные же опыты указываютъ, что происходитъ уменьшеніе прочности (300, 220, 205).

Б. Растворъ изъ 1 ч. цемента и 3 частей песка.

Песокъ для опытовъ былъ взятъ мелкій, поэтому результаты опытовъ нельзя сравнивать съ данными лабораторіи Политехническаго Института, гдѣ былъ примѣненъ нормальный песокъ.

Насколько можно судить изъ вышеприведенныхъ опытовъ, горячая вода почти не вліяетъ на уменьшеніе прочности цемента-песчанаго раствора, что видно изъ сравненія цифръ — 8,18 и 7,38, 10,5 и 8,93, 64 и 60,5. Послѣдніе цифры указываютъ, что растворъ слабо сопротивляется раздробленію.

Подогрѣваніе воды и песку до высокой температуры ( $100^{\circ}$ ), повидимому, понижаетъ прочность раствора на разрывъ (11,44 и 8,10; 15,13 и 10,59), но, какъ видно образцы удовлетворяютъ «Техническимъ Условіямъ пріемки портландъ-цементовъ». По § 8: образцы изъ смѣси портландъ-цемента и песку (1:3) должны представлять сопротивленіе разрыву черезъ 7 дней, послѣ затворенія раствора, не менѣе 7 кл. / см.<sup>2</sup> и черезъ 28 дней, послѣ затворенія раствора, не менѣе 10 кл. / см.<sup>2</sup>“

Подогрѣваніе воды, цемента и песку до высокой температуры ( $100^{\circ}$ ) вредно отражается на прочности цемента-песчанаго раствора.

Общаго заключенія о вліяніи подогрѣванія матеріаловъ до высокой температуры на прочность цементныхъ растворовъ (и бетоновъ) изъ малаго количества опытовъ, продоланныхъ нами, дать нельзя. Этотъ вопросъ еще подлежитъ болѣе детальному лабораторному обследованію. Данныя лабораторіи, производящей опыты надъ малыми образцами,

не соответствують даннымъ практики, такъ какъ отношеніе поверхности къ объему въ лабораторныхъ образцахъ весьма велико; происходитъ быстрое охлажденіе образца.

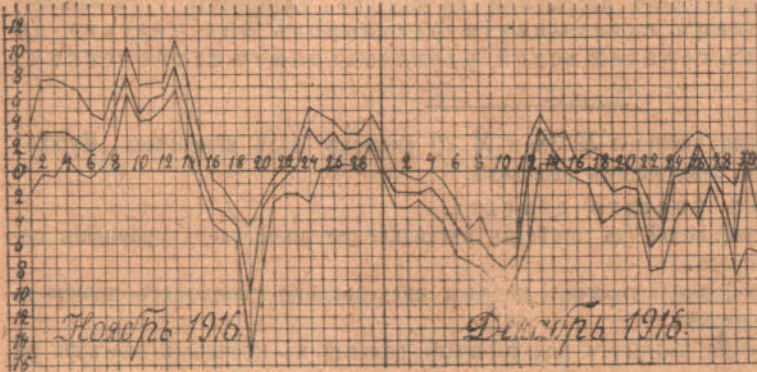
Дальнѣйшіе опыты надъ подогреваніемъ матеріаловъ для раствора (бетона) сдѣланы нами въ условіяхъ практики, а именно при постройкѣ желѣзобетонныхъ сооружений на Правобережной Стратегической у г. Кіева дорогѣ.

## ГЛАВА XII. Постройка желѣзобетонныхъ сооружений на морозѣ.

### § 40. Постройка желѣзобетоннаго моста на Правобережной Дорогѣ у г. Кіева.

Въ ноябрѣ и декабрѣ 1916 г., при выполненіи работъ по заданіямъ Военнаго Вѣдомства, нами исполнено нѣсколько желѣзобетонныхъ сооружений на морозѣ. Къ изложенію веденія этихъ работъ мы и переходимъ.

Приведемъ метеорологическія данныя Кіевского Политехническаго Института о температурѣ воздуха за мѣсяцы: ноябрь и декабрь 1916 г. и январь, февраль 1917 г. Въ теченіе этихъ мѣсяцевъ происходилъ процессъ отвердванія сооружений. По этимъ даннымъ можно прослѣдить тем-



Фиг. № 25.

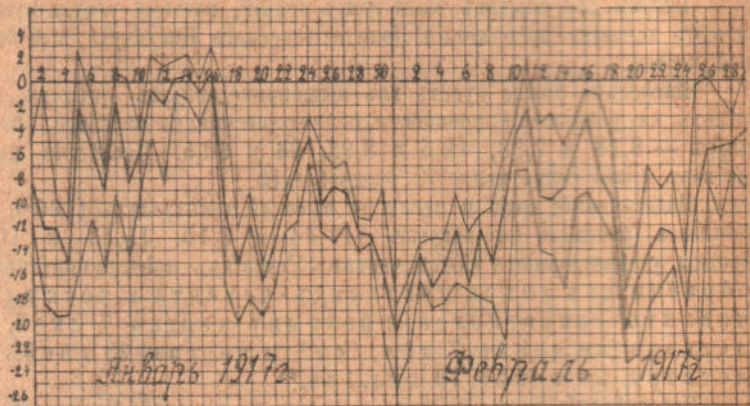
пературныя измѣненія воздуха для каждаго сооруженія, начиная съ начала бетонированія и кончая разборкой формъ.

Метеорологическія данныя представлены въ табл. № 41.

Для болѣе нагляднаго представленія построены діаграммы измѣненія температуры воздуха (см. фиг. № 25 и 26).

На фиг. № 27 и 28 представлены фасадъ и разрѣзъ моста. Мостъ — трехпролетный неразрѣзной на колоннахъ. Основанія изъ опускаемыхъ колодезь предложенной нами системы.

Опускаемые колодезь были забетонированы до наступленія морозовъ.



Фиг. № 26.

ТАБЛИЦА № 41.

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА. ГРАДУСЫ ЦЕЛЬЗИЯ.

Число по номеру стилю.	Ноябрь 1916 г.			Декабрь 1916 г.			Январь 1917 г.			Февраль 1917 г.		
	Средняя.	Максимумъ.	Минимумъ.	Средняя.	Максимумъ.	Минимумъ.	Средняя.	Максимумъ.	Минимумъ.	Средняя.	Максимумъ.	Минимумъ.
1	0,7	3,9	-1,8	-1,7	+0,3	-3	-8,6	-4,9	-11,9	-17,9	-16,4	-22,9
2	3,2	7,4	-0,2	-1,7	-0,4	-3	-12,1	+0,6	-18,4	-14,2	-13,3	-16,5
3	3,2	7,5	-0,4	-1,7	-0,7	-2,4	-12,1	-9,6	-19,4	-17,1	-13	-18,9
4	3,2	4,2	1,1	-1,3	+0,2	-3,2	-15	-11,4	-19,3	-15,5	-13	-18,4
5	2,6	6,7	-0,1	-2,6	-0,9	-4,3	-2,1	+2,6	-14,9	-12,3	-9,1	-16,9
6	1,7	4,9	-0,6	-4,5	-2,4	-7	-5,8	-1,1	-11,5	-16,8	-12,5	-21,4
7	2,3	4,2	0,4	-5,7	-4,8	-7,4	-11	-7,3	-15,8	-12,3	-11	-18
8	5	6,8	2,3	-5,7	-3,8	-8	-1,7	+0,9	-9,4	-15,2	-10,5	-18,4
9	8	10,2	6,3	-7,3	-6,5	-9,0	-8,7	+0,1	-14,5	-10,6	-6,1	-21,4
10	4,6	7,1	4,1	-8	-5,8	-10,5	-5,7	-4,2	-9,3	-4,6	-3,4	-7,5
11	6	7,2	4,3	-6,9	-5,6	-8,5	-0,4	+2,3	-4,9	-2,4	+1,7	-7,4
12	6,2	7,3	5,1	-0,4	+2,2	-6	-1,9	+1,3	-8,4	-9,5	-3,6	-14
13	8,7	10,9	6,8	3,6	4,6	0,5	+0,4	+1,8	-0,9	-9,8	-2,8	-14,5
14	5	7,9	1,6	1,7	2,9	0,5	+0,7	+2,3	-1,4	-9	-5,4	-17,3
15	0	3,2	-1,5	0,3	3,1	0	-0,9	+0,1	-3,5	-6,2	-3,3	-9,9
16	-3	-0,7	-4,2	-0,4	0,8	-0,7	+0,9	+2,9	-1	-2,7	-0,8	-9,1
17	-3,4	-1,5	-5	0,2	1,6	-1	-10,5	-0,1	-16,9	-7,7	-1,2	-11,2
18	-4,6	-3,3	-5,9	-0,2	+1,2	-4,3	-15,4	-12,1	-19,9	-9,6	-5	-13,1
19	-10,3	-4,4	-15,2	-1,8	0,9	-3,5	-12	-9,4	-18	-21	-17,4	-23,4
20	-3,2	-2,4	-8,4	-1,3	+0,5	3	-16,5	-15,3	-19,4	-16,7	-13,4	-22,8
21	-1,4	-0,4	-2,7	-1,5	-0,3	-3,5	-13,5	-11,8	-17,3	-14	-7,1	-18,6
22	-0,4	+0,4	-1,9	-6,5	-2,8	-8,2	-9,9	-9	-12,4	-12,1	-8,8	-17,1
23	+0,5	2	-1,9	-5,2	-4	-8	-7	-5,6	-11,4	-12,7	-7,6	-15,5
24	3,6	5,3	-2,5	-0,5	+1,2	-4,1	-4,8	-2,9	-6,8	-18,6	-14,6	-22,6
25	2,1	4,7	0,1	-0,1	+2,2	-2,5	-10,2	-5,6	-12,4	-10,4	-0,3	-23,1
26	3,3	4,2	0,3	2,1	3,2	-4,1	-8,7	-7,1	-13,4	-5,7	+0,1	-8,4
27	1,9	3,1	0,6	-0,3	2,7	-1,2	-9,1	-6,4	-11,4	-5,5	-1,2	-11,5
28	2	3	0,6	-2,3	-0,3	-4	-12,6	-11,2	-14,1	-5,1	-2,7	-7,6
29	2,8	4,5	2,1	-6	-1,3	-8,5	-12,8	-11,5	-13,5	-	-	-
30	0,2	2,8	-0,6	0,6	1,5	-6,5	-15,5	-9	-22	-	-	-
31	-	-	-	-5	-0,3	-6,8	-21,9	-18,6	-25,1	-	-	-



Бетонирование колонн началось 1 декабря при средней температурѣ ( $-1,7^{\circ}$ ) (см. фиг. № 25). 5 декабря при температурѣ ( $-2,6^{\circ}$ ) закончены работы по бетонированию всѣхъ 12 колоннъ. Приготовление бетона производилось ручнымъ способомъ на мѣстѣ работъ. Въ виду малаго мороза (максимумъ не превышалъ  $-4,3^{\circ}$ ) нагревалась только вода, а остальные материалы — щебень, песокъ — брались холодные.

Вода нагревалась въ чугунномъ котлѣ, какіе обыкновенно примѣняются для варки пищи въ артеляхъ. Котелъ былъ устроенъ на легкомъ кирпичномъ фундаментѣ. Подъ

котломъ помѣщалась топка, куда подлаживались дрова.

Температура воды поддерживалась отъ  $30^{\circ}$  до  $40^{\circ}$  Ц. Для предохраненія отъ излишняго охлажденія, песокъ и щебень, содержались подъ крытымъ навѣсомъ; тамъ же былъ сложенъ и цементъ. Составъ бетона для моста былъ принятъ 1 : 2 : 3. Такой сравнительно жирный бетонъ принятъ потому, что песокъ былъ слишкомъ мелкій. Бетонъ приготовлялся обычнымъ способомъ.<sup>1)</sup> На подготовленномъ подъ навѣсомъ бойкѣ (мостику) высыпаятъ въ формѣ валика определенное количество песка. Въ валикѣ пробирается лопатами, почти во всю длину его, углубленія. Въ это углубленіе высыпаятъ соответствующее количество цемента. Рабочіе засыпаютъ цементъ пескомъ. Песокъ берутъ съ боковъ валика. Послѣ этого тщательно перемѣшиваютъ песокъ съ цементомъ до получения всюду однороднаго цвѣта. Обыкновенно для этого достаточно 2—3 перелопачиванія валика.

Когда цементъ съ пескомъ перемѣшанъ, выравниваютъ лопатами валикъ и опять дѣлаютъ углубленіе по серединѣ валика почти во всю длину. Въ это углубленіе высыпаятъ соответствующее количество свѣже промытаго щебня. Щебень сначала промывался холодной водой, пока не освобождался отъ грязи, а потомъ чистый промывался горячей водой, съ дѣлю поднять его температуру. Промывка щебня производилась такимъ образомъ. На носилкахъ устанавливался боченокъ отъ цемента безъ верхняго и нижняго дна и наполнялся щебнемъ. Сверху щебень поливался холодной водой, которая насосомъ подавалась изъ ручья, протекавшаго подъ мостомъ. Вода проходила черезъ боченокъ и носилки, промывала щебень и вытекала по деревянному лотку обратно въ ручей. Поливка щебня производилась до тѣхъ поръ, пока вытекающая вода не была чиста — признакъ, что щебень чистъ. Послѣ этого продолжали поливку щебня горячей водой изъ котла ведрами — ведра 2—3. Промытый такимъ образомъ щебень всыпался въ цементно-песчаный растворъ. Рабочіе засыпали щебень сверху растворомъ, который брали лопатами съ боковъ валика. Послѣ этого производилось тщательное перемѣшиваніе сухого цементно-песчаного раствора со щебнемъ безъ добавленія воды. Мокрая щебенка обляпалась растворомъ, и вся смѣсь получала однородный сѣрый цвѣтъ. Достаточно 2-хъ перелопачиваній валика. Затѣмъ продолжалось перемѣшиваніе бетона съ добавленіемъ горячей воды.

Горячая вода изъ лейки, снабженной ситкомъ, равномерно разливалась по всей массѣ бетона. Консистенція бетона такая же, какъ и при работахъ лѣтомъ. Приготовленный та-



Фиг. № 28.

Котелъ былъ устроенъ на легкомъ кирпичномъ фундаментѣ. Подъ котломъ помѣщалась топка, куда подлаживались дрова. Температура воды поддерживалась отъ  $30^{\circ}$  до  $40^{\circ}$  Ц. Для предохраненія отъ излишняго охлажденія, песокъ и щебень, содержались подъ крытымъ навѣсомъ; тамъ же былъ сложенъ и цементъ. Составъ бетона для моста былъ принятъ 1 : 2 : 3. Такой сравнительно жирный бетонъ принятъ потому, что песокъ былъ слишкомъ мелкій. Бетонъ приготовлялся обычнымъ способомъ.<sup>1)</sup> На подготовленномъ подъ навѣсомъ бойкѣ (мостику) высыпаятъ въ формѣ валика определенное количество песка. Въ валикѣ пробирается лопатами, почти во всю длину его, углубленія. Въ это углубленіе высыпаятъ соответствующее количество цемента. Рабочіе засыпаютъ цементъ пескомъ. Песокъ берутъ съ боковъ валика. Послѣ этого тщательно перемѣшиваютъ песокъ съ цементомъ до получения всюду однороднаго цвѣта. Обыкновенно для этого достаточно 2—3 перелопачиванія валика. Когда цементъ съ пескомъ перемѣшанъ, выравниваютъ лопатами валикъ и опять дѣлаютъ углубленіе по серединѣ валика почти во всю длину. Въ это углубленіе высыпаятъ соответствующее количество свѣже промытаго щебня. Щебень сначала промывался холодной водой, пока не освобождался отъ грязи, а потомъ чистый промывался горячей водой, съ дѣлю поднять его температуру. Промывка щебня производилась такимъ образомъ. На носилкахъ устанавливался боченокъ отъ цемента безъ верхняго и нижняго дна и наполнялся щебнемъ. Сверху щебень поливался холодной водой, которая насосомъ подавалась изъ ручья, протекавшаго подъ мостомъ. Вода проходила черезъ боченокъ и носилки, промывала щебень и вытекала по деревянному лотку обратно въ ручей. Поливка щебня производилась до тѣхъ поръ, пока вытекающая вода не была чиста — признакъ, что щебень чистъ. Послѣ этого продолжали поливку щебня горячей водой изъ котла ведрами — ведра 2—3. Промытый такимъ образомъ щебень всыпался въ цементно-песчаный растворъ. Рабочіе засыпали щебень сверху растворомъ, который брали лопатами съ боковъ валика. Послѣ этого производилось тщательное перемѣшиваніе сухого цементно-песчаного раствора со щебнемъ безъ добавленія воды. Мокрая щебенка обляпалась растворомъ, и вся смѣсь получала однородный сѣрый цвѣтъ. Достаточно 2-хъ перелопачиваній валика. Затѣмъ продолжалось перемѣшиваніе бетона съ добавленіемъ горячей воды.

Горячая вода изъ лейки, снабженной ситкомъ, равномерно разливалась по всей массѣ бетона. Консистенція бетона такая же, какъ и при работахъ лѣтомъ. Приготовленный та-

<sup>1)</sup> См. И. Кирѣенко. Производство желѣзобетонныхъ работъ. Кіевъ 1915 г.

кимъ образомъ бетонъ относился въ мѣрочкахъ къ мѣсту работъ. Во избѣжаніе излишняго охлажденія, бетонная масса, какъ въ кучѣ, такъ и въ мѣрѣ, при доставкѣ къ мѣсту работы, покрывалась брезентомъ или мѣшками. Бетонщикъ, трамбуя колонну, по мѣрѣ хода работы, переносилъ кельмой въ форму колонны изъ мѣрочки принесенную массу бетона, каждый разъ тщательно прикрывая мѣшкомъ бетонную массу сверху.

Бетонная масса въ данномъ случаѣ готовилась каждый разъ въ количествѣ ограниченномъ, во избѣжаніе излишняго охлажденія. Послѣ двухъ дней работы (1 и 2 декабря) былъ перерывъ 2 дня (воскресеніе—20 ноября и двенадцатый праздникъ Введенія—21 ноября—старого стиля).

При дальнѣйшемъ бетонированіи фронтъ работъ увеличивался (трамбованіе корпуса моста). Поэтому было примѣнено машинное приготовленіе бетона. Въ разстояніи 200 саж. отъ описываемаго моста находится строившійся нами черезъ пути Московско-Кіево-Воронежской жел. дороги у ст. Кіевъ III желѣзобетонной виадукъ, большое сооруженіе—100 куб. саж. бетона по объему. На территоріи постройки виадука находился хорошо оборудованный бетонный заводъ. Была установлена большая бетономѣшалка періодическаго дѣйствія—типъ изготовляемый «Обществомъ производства машинъ для надобностей строительнаго дѣла» (С. Петербургъ). Былъ установленъ паровой котелъ (взятый отъ парового копра). Вода въ паровой котелъ подавалась при помощи парового насоса «Вортингтона» изъ озера. Изъ парового котла паръ или горячая вода, по желанію, подавались на бетонный заводъ посредствомъ specialнаго трубопровода. Бетономѣшалка приводилась въ движеніе нефтянымъ двигателемъ. Весь бетонный заводъ помѣщался въ досчатомъ сараѣ. Въ этомъ же сараѣ помѣщались песокъ и щебень для работъ. По мѣрѣ расходванія этихъ матеріаловъ, они возобновлялись въ соответствующемъ количествѣ. Для чего было сдѣлано окно въ задней стѣнѣ сарая. Подвезшіеся мерзлые матеріалы подавались черезъ это окно внутрь сарая. Для подогрѣванія мерзлыхъ матеріаловъ песка и щебня, а также и для согрѣванія завода, въ сараѣ были устроены двѣ печи. Печи были сдѣланы изъ обрѣзковъ двутавровыхъ балокъ № 50, оставшихся отъ постройки протетнаго строения виадука. Длина обрѣзка 1—1½ метра. Вертикальныя стѣнки каждой печи были сдѣланы изъ поставленныхъ вертикально четырехъ обрѣзковъ. 2 стѣнки были перекрыты положенными пламя нѣсколькими обрѣзками. Такимъ образомъ каждая печь имѣла ширину до 1 метра и длину до 1 саж. Дымъ отводился посредствомъ желѣзныхъ трубъ изъ сарая. Эти же трубы слегка обогрѣвали помѣщеніе сарая. Цементъ хранился въ расположенномъ вблизи отдѣльномъ сараѣ.

Отъ бетоннаго завода къ мостику былъ сдѣланъ тачечный путь общей длиною 200 саж.

Тачки для подачи бетона были изнутри обиты войлокомъ или мѣшками. Каждая тачка была снабжена отдѣльной крышкой, сдѣланной изъ доски 2". Крышки изнутри были обиты мѣшками или войлокомъ. (См. стр. 94).

Приготавлился бетонъ на заводѣ слѣдующимъ образомъ.

Щебень и песокъ въ количествѣ, примѣрно 1—1½ дневнаго потребленія вносились въ сарай и наваливались на вышеописанные печи изъ обрѣзковъ двутавровыхъ балокъ. Печи топились во все время производства работъ. Щебень и песокъ оттаивали и слегка прогрѣвались. Цементъ въ количествѣ, примѣрно, дневнаго потребленія утромъ въ началѣ работъ приносился въ сарай бетоннаго завода. Согревались паромъ вода и щебень. Вода согрѣвалась такимъ образомъ. Съ утра наполнялись водой изъ водопровода бочки, установленныя возлѣ бетономѣшалки. Рукавъ паропровода погружался въ бочку съ водой. Паръ, конденсируясь отдавалъ теплоту водѣ, и вода, въ теченіе 5—7 минутъ нагревалась до 30°—35° Цельсія. Затѣмъ тѣмъ же рукавомъ прогрѣвалось отиѣренное количество щебня, пуская струю пара въ кучу щебня; щебень нагревался до 35°—30° Цельсія. Нагрѣтый такимъ образомъ щебень погружался въ ковшъ бетономѣшалки въ опредѣленномъ количествѣ. Сверху засыпался песокъ взятый изъ кучи, помѣщающейся надъ печью.

Температура песка 25°—20° Цельсія. Прогрѣваніе песка паромъ не производилось, такъ какъ песокъ увлажняется, и было бы трудно угадать, какое количество воды нужно добавить

для получения бетона определенной консистенции. Сверху песка засыпался цемент. Материалы из ковша попадали в барабан бетономешалки. После 15 поворотов барабана, во время которых материалы перемешивались без добавления воды, пускалась вода в определенном количестве в барабан из бака, находящегося над бетономешалкой.

О количестве добавляемой воды можно было судить по водомерному стеклышку с делениями. После 15 оборотов барабана бетон считался перемешанным.

Один завод бетона умещался в 2 тачки, описанной выше конструкции. 2 человека, тачечник и крющник подавали бетон по тачечному пути к месту работ.

Мы привели выше температуры до которых нагревались материалы: песок  $20^{\circ} - 25^{\circ}$ , щебень  $30 - 35$ , вода  $30^{\circ} - 35^{\circ}$ . Первые цифры относятся к работам при малых, а вторые к работам при больших



Фиг. № 29.

морозах. Тачечный путь от бетономешалки к месту работ длиною 200 саж. проходилась тачечником в 5 минут. Температура бетонной массы при употреблении в дело была в среднем  $20^{\circ} - 25^{\circ}$  Цельсия.

Перейдем к дальнейшему описанию работ по бетонированию моста. 6 декабря бетонировались балки моста. Плита проезжей части лежит на трех главных балках и перпендикулярных к ним 8 поперечных. Температура воздуха  $t = -4,9^{\circ}$ . 7 и 8 декабря производилась установка арматуры плиты. На фиг. № 29, 30 видно, что забетонированные балки моста покрыты мешками. Для ограждения рабочих от сильного ветра был установлен щит (см. фиг. № 30). 9, 10 и 11 декабря производилась утрамбовка плиты и тротуаров. Как видно из фиг. № 25, средняя температура воздуха за эти дни была  $t = -7,3^{\circ}$ ,  $-8^{\circ}$ ,  $-6,9^{\circ}$ . 12, 13 и 14 декабря производилось окутывание бетона навозом.



Фиг. № 30.

Во время утрамбовки плиты, на месте работ рабочими были набиты 3 опытных кубика в деревянных формах. Кубики в формах положены на плиту моста и вместе с плитой прикрыты навозом, где и твердели в течение 50 дней. Как видно из таблицы № 41 и диаграмм № 25 и 26, в течение всего периода твердения кубиков с 10 декабря по 29 января, только в течение 8 дней средняя температура поднималась выше нуля, не превосходя  $+3,5^{\circ}$ .

Испытаніе кубиковъ было произведено 29 января въ механической лабораторіи Кіевского Политехническаго Института. Приведемъ данныя испытанія. Кубики записаны подъ №№ 4, 5 и 6.

Кубикъ № 4. При изготовленіи не потѣлъ. Испытанъ параллельно слоямъ. Размѣръ =  $12,6 \times 12,6 \times 12,5$  см.<sup>3</sup>. Первая трещина при нагрузкѣ = 31500 кил.—напряженіе 198 кил. на см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 31600 кил.—напряженіе 199 кил. на см.<sup>2</sup>.

Кубикъ № 5. При изготовленіи потѣлъ мало. Испытанъ параллельно слоямъ. Размѣръ =  $12,6 \times 12,6 \times 12,6$  см.<sup>3</sup>. Первая трещина при нагрузкѣ = 23500 кил.—напряженіе = 142 кил. на см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 23000 кил., напряженіе 146 кил. на см.<sup>2</sup>.

Кубикъ № 6. При изготовленіи потѣлъ. Испытанъ перпендикулярно слоямъ. Размѣръ  $12,4 \times 12,4 \times 12,5$  см.<sup>3</sup>. Первая трещина при нагрузкѣ 30000 кил., напряженіе 195 кил. на см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 30200 кил., напряженіе 197 кил. на см.<sup>2</sup>.

При испытаніи наблюдалось, что трещины разрушенія шли не только по замаскѣ, но и по гранитнымъ щебенкамъ, что указывало съ одной стороны на высокую прочность раствора, а съ другой на большее сѣвпленіе щебенокъ съ растворомъ.

Изъ сравненія испытанныхъ кубиковъ съ другими — лѣтней работы — выяснилось, что такое высокое напряженіе для кубиковъ лѣтней работы наступало только при возрастѣ 157 дней.

При данномъ испытаніи присутствовали деканы Механическаго и Инженернаго Факультетовъ Института.

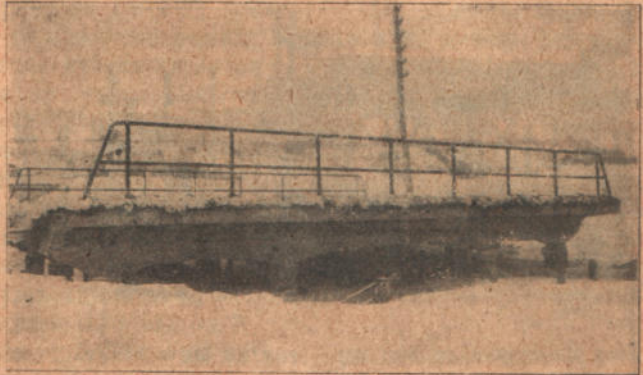
Послѣ хорошихъ результатовъ испытанія нами рѣшено было приступить къ разборкѣ формъ и подмостей моста. Эти работы были исполнены въ періодъ съ 16 по 22 февраля. Средняя температура за это время была  $t =$  отъ — 2,7 до — 21°. На фиг. № 31 представленъ мостъ, освобожденный отъ опалубки.

Считая, что процессъ тверднія достигъ степени не меньшей, чѣмъ лѣтомъ въ мѣсячный срокъ, рѣшено было снять и навозъ. Въ періодъ времени съ 22 по 28 февраля произведена и эта работа. Такимъ образомъ за все время тверднія моста только въ теченіе 8 дней [см. диаграмму: 13, 14, 15, 26, 30 Декабря и 13, 14, 16 Января] средняя температура воздуха была выше нуля, не превосходя + 3,5°. Остальное время температура воздуха была ниже нуля. Морозъ доходилъ до — 21°.

Морозы продолжались до 26-го марта, т. е. приблизительно цѣлый мѣсяцъ послѣ раскружаливанія. Самыя тщательныя и систематическія наблюденія никакихъ вредныхъ деформаций не обнаружили. Систематическія наблюденія и до настоящаго времени не обнаружили какихъ либо дефектовъ.

#### § 41. Постройка опоръ желѣзобетоннаго виадука черезъ пути Московско-Кіево-Воронежской ж. дороги у ст. Кіевъ III.

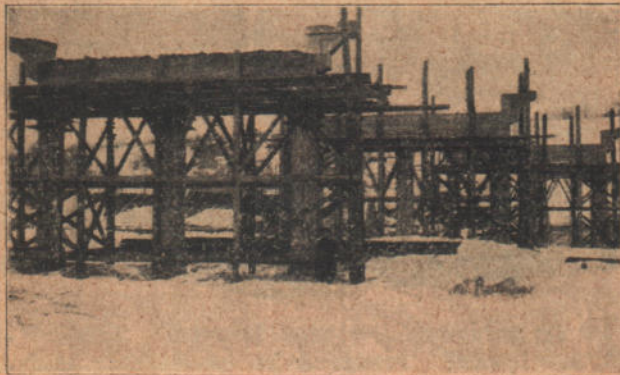
Желѣзобетонный виадукъ состоитъ изъ 4-хъ пролетовъ  $l = 12,59$  метр. Опоръ 5. Каждая изъ трехъ среднихъ опоръ состоитъ изъ разгрузной плиты, покоящейся на 7 опускныхъ колодцахъ  $d = 0,50$  саж.; на разгрузной плитѣ, установлены 3 колонны со спиральной арматурой Консидера. Длина колонны  $l = 6,82$  метр.; диаметръ колонны  $D = 0,71$  мет. На колоннахъ уложена неразрѣзная трехпролетная балка высотой  $h = 115$  метр.



Фиг. № 31.

На фиг. № 32 представлены описанные опоры. Разгрузные балки двухъ первыхъ, представленныхъ на фиг. № 32, опоръ были сдѣланы при температурѣ выше 0°. Эти опоры въ сооруженіи виадука значатся подъ № 3 и № 4, такъ мы ихъ и будемъ называть въ дальѣйшемъ. Средняя колонна опоры № 3 (первая опора на фиг. № 32) и крайняя (видимая на фиг. № 32) колонна опоры № 4 дѣлались на морозѣ. Бетонировка этихъ колоннъ производилась 16, 17, 18 ноября. Средняя колонна опоры № 3 закончена 19 ноября. Какъ видно изъ таблицы № 41 и фиг. № 25 всѣ эти дни морозные; морозъ отъ —3° до —10,3°. Остальныя колонны дѣлались въ промежутки времени 13—15 и 23—30 ноября, когда, какъ видно изъ фиг. № 25, морозовъ не было.

Верхнія, лежація на колоннахъ балки были забетонированы при слѣдующихъ условіяхъ: балка устоя № 3 забетонирована на морозѣ и сверху обутава навозомъ, а балка устоя № 4 бетонировалась въ теплякѣ. Дѣло въ томъ, что вслѣдствіе рѣзкаго паденія температуры [19 ноября средняя температура воздуха была —10,3°, а минимальная —15,2] и большой стоимости сооруженія (до 200000 р.) съ одной стороны, и отсутствія научно обоснованной теоріи и практики тверднѣя на морозѣ съ другой стороны, намъ, по независящимъ отъ насъ обстоятельствамъ, пришлось дѣлать тепляки.



Фиг. № 32.

Приготовленіе бетонной массы на бетонномъ заводѣ, какъ для частей сооруженій, сдѣланныхъ на морозѣ, такъ и для частей, сдѣланныхъ въ теплякахъ, было одинаковое и ничѣмъ не отличалось отъ описаннаго уже въ предыдущемъ параграфѣ.

Вода, щебень и песокъ точно также нагревались, какъ и для описаннаго въ предыдущемъ параграфѣ мостика. Но такъ какъ въ данномъ случаѣ была меньшая потеря теплоты, такъ какъ сооруженіе находится возлѣ самаго бетоннаго завода, то температура нагрѣтыхъ матеріаловъ была принята меньше. Вода была нагрѣта до 30°, щебень 29, песокъ 15°—20° въ среднемъ.

Теплякъ былъ сдѣланъ такимъ образомъ. Подмости опоръ № 3 и № 4 были обиты со всѣхъ сторонъ и сверху досками. Щели были замазаны глиной. Согрѣваніе тепляковъ производилось паромъ, который впускался черезъ специально проведенный паропроводъ. Температура воздуха въ теплякѣ колебалась отъ —1° до +6°.

### Опыты на вліяніе низкихъ температуръ, произведенныя при постройкѣ виадука.

При постройкѣ виадука произведенъ рядъ опытовъ. Здѣсь мы приведемъ опыты, относящіеся къ постройкѣ опоръ виадука. Замѣтимъ, что при постановкѣ опытовъ надъ вліяніемъ низкихъ температуръ на твердѣющіе цементные растворы, обычныя въ лабораторіяхъ формы для кубиковъ изъ чугуна или желѣза въ данномъ случаѣ совершенно не пригодны. Чугунъ и желѣзо, какъ хорошіе проводники тепла, начинаютъ какъ бы высасывать теплоту изъ образца, лишь только появится разность температуръ образца и окружающей среды.

То же можно сказать и о постановкѣ опытовъ на линіи въ лѣтнее время. Болѣе высокая температура воздуха быстро передается металломъ формъ твердѣющему бетону. Поэтому во всѣхъ нашихъ опытахъ, поставленныхъ на мѣстѣ работъ, примѣнялись деревянные формы.

Примѣненіе дерева въ данномъ случаѣ оправдывается еще и тѣмъ соображеніемъ, что формы для желѣзобетонныхъ сооружений, обычно, деревянные. Поэтому примѣненіе деревянныхъ формъ гарантируетъ, помимо всего прочаго, наиболѣе сравнимые результаты. Всѣ приведенные ниже образцы испытывались въ Механической лабораторіи Кіевского Политехническаго Института профессоромъ, завѣдывающимъ лабораторіей, и протоколы испытанія выдавались официально за № и съ соответствующей подписью. Ниже при описаніи опытовъ приводятся данныя протоколовъ.

Разсмотримъ два связанныхъ между собою опыта—кубики № 4 и № 4а.

1. Кубикъ № 4. Кубикъ размѣрами  $12 \times 12 \times 12$  см.<sup>3</sup> приготовленъ 18 ноября изъ матеріала, употреблявшагося на устройство колонны № 3 опоры № 4. Составъ бетона 1:2:3. Температура воздуха— $4,6^{\circ}$ .

Бетонъ приготовлялся бетономѣшалкой.

Температура: воды  $t = 29^{\circ}$ ; щебня  $t = 30^{\circ}$ ; песку  $t = 15^{\circ}$ ; цементъ холодный. Выходъ замѣса 2 ч. 20 м. дня. Начало бетонирования 2 ч. 45 мин. Конечъ бетонирования 2 ч. 55 м. Послѣ изготовленія кубикъ хранился все время на открытомъ воздухѣ безъ поливки и вообще безъ всякаго ухода. Испытанъ 22 декабря (возрастъ 34 дня (температуру можно прослѣдить по фиг. № 25). Первая трещина при нагрузкѣ 12500 кил.; напряженіе 97 кил./см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 19500 кил.; напряженіе 135 кил./см.<sup>2</sup>.

2. Кубикъ № 4а. Изготовленъ изъ того же матеріала и при всѣхъ тѣхъ же условіяхъ, что и предыдущій. Размѣры такіе же. Хранился у колонны № 3 опоры № 4 на открытомъ воздухѣ до 26 ноября. Съ 26 ноября былъ сдѣланъ для опоры № 4 теплякъ, и кубикъ вмѣстѣ съ колонной попалъ въ теплякъ, гдѣ и твердѣлъ до испытанія. Первая трещина при нагрузкѣ 12000 кил.; напряженіе 83 кил./см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 19810 кил.; напряженіе 138 кил./см.<sup>2</sup>.

Сравнивая условія твердѣнія кубиковъ, мы видимъ, что они въ теченіе 9 дней одинаковы. Съ 26 ноября кубикъ № 4а, находился въ теплякѣ, температура котораго колебалась отъ ( $-1^{\circ}$ ) до ( $+6^{\circ}$ ). Кубикъ № 4 продолжалъ оставаться на открытомъ воздухѣ до испытанія 22 декабря, т. е. почти мѣсяцъ. Въ теченіе этого періода средняя температура опускалась до ( $-8^{\circ}$ ) доходя до максимума ( $-10,5^{\circ}$ ). Результаты какъ мы видимъ одинаковы. Отсюда слѣдуетъ, что теплякъ, спустя нѣсколько дней послѣ затворенія, никакой роли не играетъ; что и слѣдовало ожидать, исходя изъ изложенной нами теоріи.

Разсмотримъ другую пару связанныхъ между собою опытовъ—кубики № 17 и № 18.

3. Кубикъ № 17. Размѣры  $12,05 \times 12,10 \times 12,10$  см.<sup>3</sup>. Приготовленъ 6 декабря изъ матеріала, употреблявшагося на устройство верхней (неразрѣзной) балки опоры № 4. Составъ бетона 1:2,5:4. Бетонъ приготовлялся бетономѣшалкой, на заводѣ.

Температура: воздуха ( $-4,5^{\circ}$ ), на бетонномъ заводѣ ( $-1^{\circ}$ ), воды  $+25^{\circ}$ , щебня  $+25^{\circ}$ , песка  $+15^{\circ}$ . Цементъ холодный. Образецъ забетонированъ въ 9 ч. вечера и до утра находился на открытомъ воздухѣ. Послѣ чего поставленъ въ теплякъ опоры № 4. Возрастъ кубика 53 дня. Первая трещина появилась при разрушающей нагрузкѣ 14500 кил.; напряженіе 99 кил./см.<sup>2</sup>. Щебень довольно легко отдѣляется отъ цемента (протоколъ № 463);

4. Кубикъ № 18. Размѣры  $12 \times 12 \times 12$  см.<sup>3</sup>.

Приготовленъ 8 декабря изъ матеріала, употреблявшагося на устройство верхней (неразрѣзной) балки опоры № 4. Составъ бетона 1:2,5:4. Бетонъ приготовлялся бетономѣшалкой на заводѣ. Температура: воздуха ( $-5,7^{\circ}$ ), на бетонномъ заводѣ ( $-1^{\circ}$ ) воды  $+25^{\circ}$ , щебня  $+25^{\circ}$ , песка  $+15^{\circ}$ . Цементъ холодный. Образецъ непосредственно послѣ бетонирования хранился въ теплякѣ опоры. Возрастъ кубика 88 дней. Первая трещина при нагрузкѣ 19200 кил.; напряженіе 133 кил./см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 20700 кил.; напряженіе 144 кил./см.<sup>2</sup> (протоколъ № 437).

Разсматривая условія твердѣнія обоихъ кубиковъ мы замѣчаемъ, что кубикъ № 17 непосредственно послѣ бетонирования твердѣлъ въ теченіе ночи на морозѣ, а кубикъ № 18 послѣ бетонирования былъ помѣщенъ въ теплякъ. Вслѣдствіе малаго объема кубика № 17 по отношенію къ его поверхностямъ охлажденія, процессъ схватыванія не

успѣлъ закончиться, пока кубикъ охладился и возможно даже, что вода могла замерзнуть. Затѣмъ въ теплякѣ произошло оттаиваніе. Такой процессъ вредно отразился на прочности кубика и въ результатѣ напряженіе кубика всего 99 кил./см.<sup>2</sup>. Въ кубикѣ № 18 эти причины были удалены, и результатъ получился хорошій.

Разсмотримъ слѣдующіе 2 кубика № 7 и № 8.

5. Кубикъ № 7. Изготовленъ ручнымъ способомъ 21 ноября. Составъ бетона 1 : 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> : 4. Температура: атмосферы во время изготовленія + 1°, воды, нагрѣтой паромъ — + 33°, щебня, нагрѣтаго паромъ + 29°. Песокъ и цементъ безъ согрѣванія, но не мерзлые. Температура готовой бетонной массы послѣ перемѣшиванія  $t = +12,5^{\circ}$ . Бетонная масса была приготовлена въ 2 часа 18 мин. дня. Начало бетонированія кубика 2 часа 19 мин.; конецъ бетонированія 2 часа 29 м. дня. Весь періодъ тверднія кубика прошелъ на открытомъ воздухѣ. Возрастъ кубика 30 дней. Испытаніе произведено 22 декабря. Размѣръ 12 × 12 × 12 см.<sup>3</sup>. Разрушающая нагрузка 30000 кил.; напряженіе 208 кил./см.<sup>2</sup>.

6. Кубикъ № 8. Приготовленъ изъ того же замѣса, что и кубикъ № 7. Періодъ тверднія въ тѣхъ же условіяхъ, что и у кубикѣ № 7. Начало бетонированія кубика въ 3 ч. 6 мин. дня; т. е. черезъ 48 минутъ послѣ перваго кубика. Возрастъ кубика 30 дней. Испытаніе произведено 22 декабря. Первая трещина при нагрузкѣ 15500 кил.; напряженіе 108 кил./см.<sup>2</sup>. Разрушающая нагрузка 16240 кил.; напряженіе 113 кил./см.<sup>2</sup>. Разсматривая условія приготовленія кубика, мы замѣчаемъ, что температура готовой бетонной массы, передъ употребленіемъ въ дѣло, была 12,5°. Первый кубикъ бетонировался черезъ 48 мин. послѣ 1-го. За это время, бетонная масса, лежавшая на открытомъ воздухѣ неприкрытой, успѣла значительно охладиться. Поэтому запасъ теплоты во второмъ кубикѣ несравненно меньше, чѣмъ въ первомъ. По кривой температуръ (фиг. № 25) можно прослѣдить весь періодъ тверднія. Первые дни по изготовленіи были теплые, чѣмъ и можно объяснить, что и второй кубикъ далъ удовлетворительный результатъ. Какъ и слѣдовало ожидать, твердніе въ первомъ шло болѣе интенсивно и результатъ получился весьма хорошій.

7. 6 кубиковъ 20 × 20 × 20 см.<sup>3</sup>. Кубики изготовлены 8 марта при комнатной температурѣ. При чемъ 3 кубика подъ № 100a<sub>1-3</sub> были сейчасъ же послѣ изготовленія вынесены на морозъ, а 3 кубика подъ № 100b<sub>1-3</sub> остались въ помѣщеніи. Кубики изъ чистаго цементнаго раствора. Каждые три кубика дѣлались въ общей формѣ изъ досокъ толщиной 2". Кубики, вынесенные на морозъ, были покрыты доской, толщиной 2" и сверху доска прикрыта навозомъ. Кубики, оставленные въ помѣщеніи, поливались нѣсколько разъ въ день, а кубики, твердѣвшіе на морозѣ, оставались безъ поливки. Кубики были испытаны 19 марта въ возрастѣ 12 дней.

Кубикъ № 100a<sub>1</sub>.

Первая трещина при напряженіи. . . . . = 275 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе. . . . . 361 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 100a<sub>2</sub>.

Первая трещина при напряженіи. . . . . = 246 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе. . . . . 258 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 100a<sub>3</sub>.

Первая трещина при напряженіи. . . . . = 162 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе. . . . . 162 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 100b<sub>1</sub>.

Первая трещина при напряженіи. . . . . = 338 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе. . . . . 550 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 100b<sub>2</sub>.

Первая трещина при напряженіи. . . . . = 422 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе. . . . . 573 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 100<sub>b</sub>.

Первая трещина при напряженіи . . . . . = 450 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе . . . . . 600 кил. на см.<sup>2</sup>

Температура наружнаго воздуха за періодъ тверднїи съ 8 по 19 марта, за исключеніемъ 15 марта ( $t=0,5$ ) была ниже нуля. Морозъ доходилъ максимумъ до 18° (13-го и 17 марта), минимумъ до 0,1° (14 марта).

Какъ видно изъ данныхъ испытанїа, напряженїа понизились довольно сильно, но прочность получилась достаточная.

Это можно объяснить незначительнымъ запасомъ теплоты, такъ какъ матеріалы (цементъ и вода) имѣли комнатную температуру приблизительно +20° С.

8. Кубики № 9, № 10 и 13. Размѣры 7×7×7 см.<sup>3</sup>.

Кубикъ № 9 изготовленъ на обыкновенной водѣ при комнатной температурѣ.

Первая трещина при напряженіи . . . . . = 270 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе . . . . . 440 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 10 приготовленъ на кипяткѣ.

Первая трещина при напряженіи . . . . . = 435 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе . . . . . 543 кил. на см.<sup>2</sup>

Кубикъ № 13 приготовленъ на кипяткѣ.

Первая трещина при напряженіи . . . . . = 479 кил. на см.<sup>2</sup>

Разрушающее напряженіе . . . . . 550 кил. на см.<sup>2</sup>

Для опредѣленїа качества бетона, сдѣланнаго на морозѣ, кромѣ описанныхъ выше опытовъ съ кубиками при чистомъ сжатїи, были поставлены опыты „на сжатїе при изгибѣ.“ Для этого были сдѣланы пробные балочки „Эмпергера“ (фиг. № 33).

Балочка № 2. Балочка изготовлена 18 ноября изъ матеріала, употреблявшагося на устройство колоннъ опоры № 4. Составъ бетона и способъ приготовленїа матеріала описанъ выше (см. кубикъ № 4 — стр. 115).

Начало бетонированїа 12 ч. 10 м. дня, конецъ бетонированїа 12 ч. 40 м. дня.

Весь періодъ тверднїа до испытанїа, произведеннаго 22 Декабря, т. е. 34 дня, балочка хранилась на открытомъ воздухѣ, безъ поливки. Сверху была прикрыта доской; такъ что бетонъ отовсюду былъ окутанъ деревомъ.

По діаграммѣ температуръ (фиг. № 25) можно прослѣдить колебанїе температуры атмосферы.

Балочка испытывалась непосредственной нагрузкой на неподвижныхъ бетонныхъ опорахъ, что было провѣрено установленнымъ катетометромъ; при опытѣ опредѣлялся прогибъ середины балки въ миллиметрахъ.

Разрушающая нагрузка  $P = 907$  кил. Наибольшїй наблюдавшїйся прогибъ 17,8 милл. Данныя испытанїа приведены въ прилагаемой таблицѣ № 42.



Фиг. № 33.

ТАБЛИЦА № 42.

Нагрузка въ килогр.	40	200	250	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	560
Прогибъ въ милл.	0	0	0,1	0,3	0,55	0,7	0,95	1,05	1,4	1,55	1,7	2,0	2,5	3,0
Нагрузка въ килогр.	590	640	680	700	730	760	820	880	897	907				
Прогибъ въ милл.	3,3	3,85	4,3	4,5	5,05	5,40	6,35	7,6—13,8	15,1—17,3	17,8—разр.				



Напряженіе, соответствующее разрушающей нагрузкѣ  $\sigma_0 = 350$  кил./см.<sup>2</sup> Нейтральная ось  $x = 5,56$  сант. Собственный вѣсъ балки  $g = 0,10 \times 0,07 \times 2400 = 17$  кил. на 1 погонный метръ принятъ во вниманіе.

Балочка № 3. Балочка изготовлена 30 ноября изъ матеріала, употреблявшагося на верхнюю неразрѣзную балку опоры № 3. Составъ бетона и способъ приготовления матеріала такой же какъ и для балки опоры № 4 (см. кубикъ № 17, стр. 115). Весь періодъ тверднѣнія до испытанія, произведеннаго 3 февраля 1917 года, т. е. 64 дня, балочка хранилась на открытомъ воздухѣ безъ поливки. Сверху была прикрыта доской. По диаграммѣ температуръ (фиг. № 25) можно прослѣдить колебаніе температуры атмосферы. Передъ отправкой въ Политехникумъ рабочіе случайно уронили балку, и она треснула по серединѣ. Поэтому испытывалась только половина балки. Сѣченіе балки 7,2 см.  $\times$  10,8 см. Разстояніе между опорами  $l = 90$  см. Испытаніе произведено на 5-ти тонномъ прессѣ Амслера. Разрушающая нагрузка  $P = 1750$  кил. Наибольшій наблюдавшійся прогибъ 2 миллим. Данныя испытанія приведены въ прилагаемой таблицѣ № 43.

ТАБЛИЦА № 43.

Нагрузка въ килогр.	0	200	400	600	800	1200	1400	1600	1750
Прогибъ въ миллим.	0	0,15	0,30	0,50	0,75	1,00	1,30	1,60	2,00

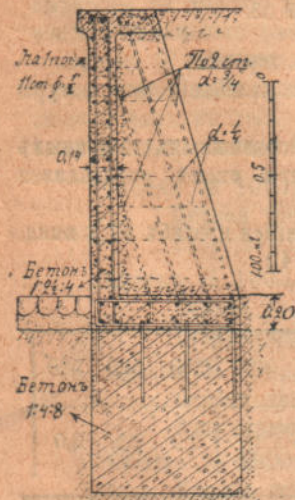
Напряженіе, соответствующее разрушающей нагрузкѣ  $\sigma_0 = 267$  кил./см.<sup>2</sup> Нейтральная ось  $x = 5,83$  см. Собственный вѣсъ балки  $g = 0,108 \times 0,0072 \times 1.2400 = 17,2$  килогр. на 1 пог. метр. принятъ во вниманіе.

Полученныя напряжения на сжатіе при изгибѣ въ обѣихъ балочкахъ свидѣтельствуютъ о высокомъ качествѣ бетона, твердѣвшаго на морозѣ безъ особаго ухода.

## § 42. Постройка желѣзобетонныхъ сооружений: подпорной стѣнки, двухъ лотковъ и водобойныхъ ступенекъ на Правобережной дорогѣ у г. Кіева.

### 1. Постройка подпорной стѣнки.

Желѣзобетонная подпорная стѣнка расположена у подножья Выдубецкаго монастыря; поддерживаетъ полотно вышележащей Выдубецкой улицы въ мѣстѣ примыканія ея къ Правобережной дорогѣ. Длина стѣнки 17,00 саж. Конструкция видна изъ прилагаемаго чертежа (фиг. № 34). Фундаментъ сдѣланъ изъ бетона состава 1:4:8; стѣнка изъ бетона состава 1:2½:4.



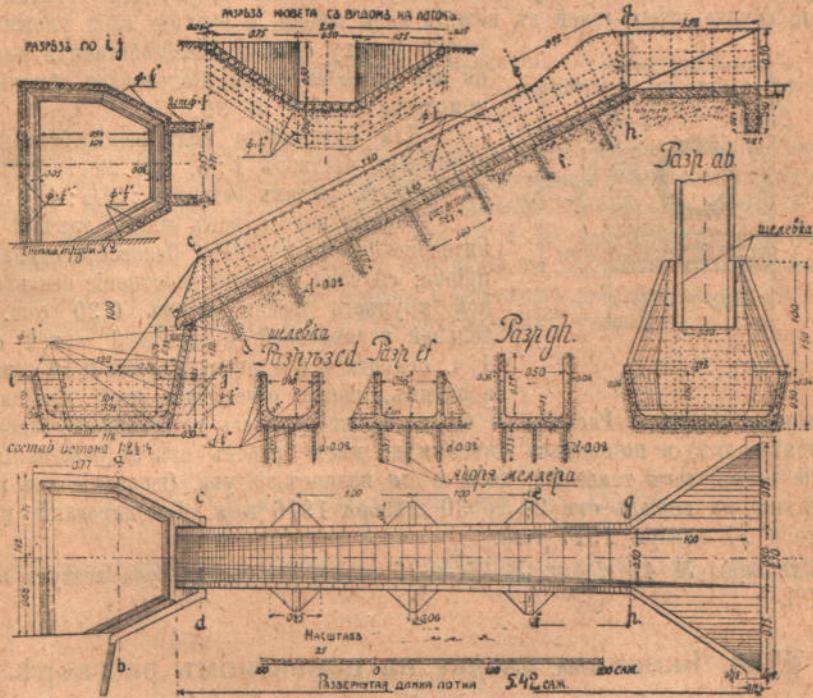
Фиг. № 34.

Бетонныя работы при низкой температурѣ велись ручнымъ способомъ, описаннымъ выше.

Согрѣвался вода и щебень; въ періодъ болѣе низкихъ температуръ согрѣвался и песокъ. Щебень согрѣвался передъ употребленіемъ въ дѣло поливкой горячей водой; песокъ согрѣвался на специально сдѣланныхъ печахъ изъ обрѣзковъ двутавровыхъ балокъ (печи описаны выше). Температура воды приблизительно  $+30^{\circ}$ , температура щебня  $+25^{\circ}$ , температура песку тоже около  $+20$ . Вода согрѣвалась въ котлѣ. Ночью работы не велись. Для предохраненія охлажденія утрамбованнаго бетона во время перерыва работъ ночью, сдѣланныя части сооружения укрывались навозомъ сверху и съ боковъ. Утромъ навозъ снимался, поверхность смывалась горячей водой, слегка взрыхлялась и накладывался новый слой бетона. Бетонированіе фундамента закончено 16 ноября. Бетонированіе стѣнки производилось отъ 26 Ноября по 9 Декабря и отъ 17 Дек. до 23 Дек. Изъ диаграммы температуръ (фиг. № 25) видны колебанія температуръ во время работъ. Разборка формъ произведена весной. Всего сдѣлано на морозѣ около 3,50 кубическихъ саженей кладки.

## 2. Постройка двух желѣзобетонныхъ лотковъ и водобойныхъ ступенекъ

На прилагаемомъ чертежѣ № 34 приведена конструкция одного изъ желѣзобетонныхъ лотковъ. Одинъ лотокъ расположенъ возлѣ вышеописанной подпорной стѣнки, а другой и водобойная ступенька находятся у подножія лаврскихъ горъ. Составъ бетона для всѣхъ этихъ сооружений 1 : 3 : 6. Всего бетонной кладки 4,18 куб. саж.



Фиг. № 35.

Приготовление бетона для всѣхъ сооружений дѣлалось ручнымъ способомъ, какъ описано выше. Подогрѣвались матеріалы—вода, щебень и песокъ—такимъ же образомъ, какъ и при постройкѣ подпорной стѣнки и до такой же приблизительно температуры.

1. Лотокъ возлѣ подпорной стѣнки съ водобойнымъ колодезѣмъ, спускающій воду изъ желѣзобетонной трубы, бетонировался въ періодъ отъ 17 по 23 декабря при температурѣ отъ  $(+0,2^{\circ})$  до  $(-5,2^{\circ})$ . Штукатурка лотка и водобойнаго колодеза растворомъ 1 : 3 производилась отъ 24 до 30 декабря включительно при температурѣ отъ  $(-0,5)$  до  $(-6^{\circ})$ .

2. Лотокъ съ водобойнымъ колодезѣмъ у трубы № 2 (фиг. № 35), спускающій воду въ желѣзобетонную эллиптическую трубу изъ кювета Николаевского спуска къ Цѣнному мосту, бетонировался отъ 26 ноября по 9 декабря.

Температура воздуха колебалась въ эти періоды: отъ  $(+2,1^{\circ})$  до  $(-7,3^{\circ})$  (см. таблицу № 41 и фиг. № 25).

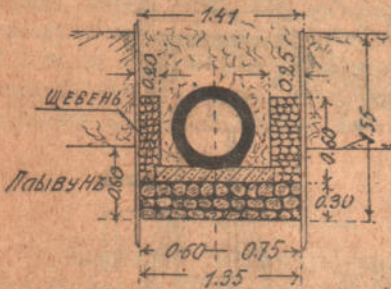
3. Ступеньки. 7 штукъ ступенекъ расположены въ ступеньчатомъ кюветѣ, подходящемъ къ вышеописанному лотку, и двѣ большихъ ступени—въ руслѣ потока, выходящаго изъ эллиптической желѣзобетонной трубы № 2 и втекающаго въ Днѣпръ.

Ступеньки бетонировались въ періодъ отъ 14 по 23 ноября. Температура воздуха за это время колебалась отъ  $+5^{\circ}$  до  $-10,3^{\circ}$  (см. фиг. № 25 и табл. № 41).

### § 43. Постройка водопроводной галлерей.

Водопроводная галлерей устроена под насыпью Правобережной дороги у ст. Кіевъ III (подходъ къ виадуку) для пропуска водопровода, питающаго ст. Кіевъ II. Галлерей состоитъ изъ желѣзобетонной трубы діаметромъ 0,50 саж.

Грунтъ основанія—пльвунъ. Пришлось забить шпунтовья стѣнки, сдѣлать уплотненіе грунта втрамбовкой въ нижній слой щебня, а верхніе слои уложить на растворѣ. Сверху сдѣлана желѣзобетонная плита и уже по ней уложена труба. Поперечное сѣченіе галлерей приведено на фиг. № 36.



Фиг. № 36.

Для фундамента подъ желѣзобетонную плиту примѣненъ растворъ 1 : 6. Для желѣзобетонной плиты принятъ составъ бетона 1 : 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> : 4.

Работы велись какъ днемъ, такъ и ночью при интенсивномъ водоотливѣ. Основаніе сдѣлано въ два приема: сначала сдѣлано уплотненіе основанія засыпкой крупнаго щебня слоемъ 0,30 саж. съ тщательной утрамбовкой и засыпкой сухой смѣси изъ 1 ч. цемента и 6 ч. песку, слоями 0,10 саж. (3 слоя), а затѣмъ, послѣ отверднѣнія этой кладки уложена желѣзобетонная подушка. Растворъ и бетонъ приготавливались на бетонномъ заводѣ виадука (на бетономъшалѣ) и подавались тачками на мѣсто работъ изъ за разстоянія 25 саж. Нагрѣваніе матеріаловъ такое же, какъ и для колоннъ виадука. Основаніе изъ гранитнаго щебня сдѣлано въ періодъ отъ 24 до 30 декабря 1916 года. Бетонированіе плиты сдѣлано 26-го и 27 января 1917 года.

Изъ таблицы № 41 и фиг. № 25 и 26 видно, что температура воздуха опускалась до (—9,1°).

### § 44. Каменная кладка на цементномъ растворѣ.

Въ 1917 году при постройкѣ опытнаго дома изъ бетонныхъ пустотѣлыхъ камней на территоріи Черторойскихъ Мастерскихъ (возлѣ Кіева) Кіевского Округа Путей сообщенія, фундаментъ изъ гранитнаго камня нами дѣлался на морозѣ до —11°. Цементный растворъ былъ принятъ для нижняго слоя 1 : 3; для средняго слоя 1 : 4 и верхняго 1 : 6. Приготовленіе раствора велось ручнымъ способомъ. Вода нагрѣвалась въ котлѣ до температуры 40°—50° С. Песокъ былъ заготовленъ въ диктовомъ баракѣ, температура котораго поддерживалась отъ 1-го до 2-хъ градусовъ выше нуля. Въ диктовомъ баракѣ готовился сухой растворъ, который на носилкахъ привозился къ мѣсту работъ.



Фиг. № 37.

Здѣсь въ творяльномъ ящикѣ производилось перемѣшиваніе сухого раствора съ горячей водой. Камень подносился носилками къ мѣсту работъ и поливался для согрѣванія горячей водой. Фундаментъ дѣлался частью подъ лопатку, частью подъ заливку.

Всего сдѣлано 6,45 куб. саж. кладки. На ночи, во время перерыва работъ, кладка закрывалась навозомъ. По окончаніи работъ кладка была сверху закрыта навозомъ —

слой 4 — 5 вершковъ. При осмотрѣ кладки черезъ нѣсколько дней обнаружилось, что цементный растворъ хорошо схватился.

На фиг. № 37 видны: котель съ горячей водой, носилки съ камнемъ, бочка съ приготовленнымъ растворомъ для заливки и часть фундамента.

Слѣдуетъ замѣтить, что навозъ для покрытія поверхностей бетона долженъ быть сухой, т. е. безъ выдѣленія влаги. Влага эта вредна для бетона, такъ какъ содержитъ въ себѣ органическія кислоты.

---

Уже заканчивалось печатаніе настоящаго труда, когда мы познакомились съ новыми русскими техническими условіями на производство бетонныхъ и желѣзобетонныхъ работъ, утвержденными Министромъ Путей Сообщенія бывшей Россійской Имперіи 10 іюня 1917 года по журналу Инженернаго Совѣта отъ 10 и 16 мая 1917 года за № 33. Въ этихъ техническихъ условіяхъ есть много измѣненій по сравненію съ прежними техническими условіями, и въ частности по вопросу о бетонныхъ работахъ на морозѣ. Считаемо не лишнимъ привести извлеченія изъ этихъ техническихъ условій.

---

## ТЕХНИЧЕСКІЯ УСЛОВІЯ

### производства бетонныхъ и желѣзобетонныхъ работъ.

---

#### ОТДѢЛЬ II.

#### Общія правила производства бетонныхъ и желѣзобетонныхъ работъ.

##### I. Общія условія.

§ 16. Всѣ работы должны производиться подъ непосредственнымъ наблюденіемъ опытныхъ техниковъ. *Опытность таковыхъ лицъ* должна быть удостовѣрена исполнителемъ работъ.

§ 17. Приготовленіе бетона и укладка его въ сооруженіе должны вестись такимъ образомъ, чтобы бетонъ могъ быть употребленъ въ дѣло вслѣдъ за изготовленіемъ. Сроки для окончанія всѣхъ работъ по изготовленію, укладкѣ и уплотненію бетона устанавливаются Техническимъ надзоромъ въ зависимости отъ скорости схватыванія и другихъ свойствъ цемента, отъ свойствъ прочихъ матеріаловъ, а также и отъ состоянія погоды, причемъ допускается бетонированіе и послѣ начала схватыванія цемента, но ни въ какомъ случаѣ не позже половины срока конца его схватыванія.

§ 18. Мѣсто заготовки бетона должно быть располагаемо возможно ближе къ мѣсту работъ, чтобы *подача бетона* могла производиться *безъ замедленія*. Во избѣжаніе раструски и разъединенія смѣшанной массы бетонъ слѣдуетъ подавать къ мѣсту работъ ведрами, носилками, тачками, вагонетками и т. п. Подача бетона перебрасываніемъ допускается лишь при условіи восстановленія новымъ перемѣшиваніемъ однородности смѣси, если таковая окажется нарушенной.

§ 19. *Въ знойные и сухіе дни должны быть принимаемы мѣры для предохраненія бетона отъ вреднаго дѣйствія зноя и сухости воздуха, для чего, напр., увеличивается количество воды, прибавляемой въ бетонъ при его изготовленія, а свѣжій бетонъ въ сооруженіи покрывается для защиты отъ быстрого высыханія и смачивается периодически водой.*

§ 20. *При установившейся температурѣ ниже 0° веденіе работъ на открытомъ воздухѣ безусловно воспрещается; а потому при наступленіи сплошныхъ морозовъ, равно какъ и при отсутствіи сплошныхъ морозовъ, но если температура при заморозкахъ падаетъ ниже—5° С, производство работъ допускается только въ теплякахъ.*

Въ случаѣ необходимости заканчивать производство кладки бетонныхъ или желѣзобетонныхъ сооруженій въ холодное время, но до наступленія сплошныхъ морозовъ, а равно во всѣхъ случаяхъ, когда температура окружающей атмосферы или грунтовыхъ водъ низка и не превосходитъ +5° С, допускается производство работъ на открытомъ воздухѣ, если кладка можетъ быть возводима при температурѣ выше нуля, а температура при заморозкахъ опускается не ниже—5° С; при этомъ требуется однако, въ видахъ обезпеченія прочности возводимыхъ сооруженій, примѣнять нижеслѣдующія мѣры предосторожности.

а) прогрѣвать входящіе въ составъ бетона инертные матеріалы и приготавливать бетонъ на теплой водѣ;

б) избѣгать, по возможности, покрытія грунтовой водой низкой температуры не вполне схватившагося слоя бетона;

в) передъ укладкой бетона обогрѣвать поверхности, къ которымъ долженъ прикасаться бетонъ;

г) примѣнять бетонъ болѣе жирнаго состава, а въ желѣзобетонныхъ сооруженіяхъ непосредственно передъ бетонированіемъ обмазывать арматуру растворомъ цемента;

д) добавлять по требованію Техническаго надзора хлористый кальцій или поваренную соль къ водѣ, на которой растворяется цементный растворъ бетона, употребляемого для бетонныхъ сооруженій, не примѣняя однако этой мѣры для кладки стѣнъ жилыхъ помѣщеній;

е) охранять кладку отъ дѣйствія мороза, напримѣръ, засыпкою пескомъ или покрытіемъ тюфяками, причѣмъ съ наступленіемъ теплаго времени освобождать кладку отъ защиты, предоставляя ее вліянію теплаго воздуха съ цѣлью ускоренія процесса тверднія;

ж) не подвергать не вполне затвердѣвшую кладку, схваченную морозомъ, дѣйствию болѣе или менѣе значительныхъ нагрузокъ (напр., не слѣдуетъ производить земляныхъ работъ надъ трубами, засыпку позади подпорныхъ стѣнокъ и т. п. ранѣе, чѣмъ кладка по наступленіи теплаго времени успѣетъ достаточно окрѣпнуть);

з) кладку, схваченную морозомъ, по наступленіи теплой погоды, если растворъ сохранилъ вязкость, выдерживать не менѣе такого срока, чтобы общій срокъ тверднія бетона при теплой погодѣ, т. е. при температурѣ не ниже +5° С, былъ не менѣе требуемаго техническими условіями; если же таковой срокъ по условіямъ производства работъ не можетъ быть выдержанъ, то допускаемую на бетонъ нагрузку уменьшать въ соотвѣтствіи съ уменьшеніемъ его прочности;

и) въ случаяхъ устройства фундаментовъ непосредственно на замороженномъ грунтѣ (вѣчная мерзлота, способъ вымораживанія грунта) не допускать продолженія кладки сейчасъ же послѣ окончанія нижняго слоя, а выдерживать нижній слой незагруженнымъ послѣдующей кладкой въ теченіе не менѣе 3—4 дней, для того чтобы слой этотъ при соотвѣтственномъ прогрѣваніи кладки успѣлъ достаточно окрѣпнуть;

к) на мѣстѣ работъ изъ употребляемого бетона заготавливать въ достаточномъ количествѣ пробные кубики бетона, сохранять ихъ по возможности въ такихъ же условіяхъ, въ какихъ находится и само сооруженіе, и производить испытанія ихъ по истеченіи назначенныхъ сроковъ выдерживанія кладки для выясненія степени затверднія бетона и достаточности такихъ сроковъ.

§ 21. При производствѣ работъ въ теплякахъ температура въ нихъ какъ во время самаго производства работъ, такъ и во время послѣдующаго выдерживанія кладки, должна поддерживаться по возможности около  $+10^{\circ}\text{C}$  и ни въ какомъ случаѣ не понижаться ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Нагрѣвательные приборы должны обеспечивать по возможности равномерное обогрѣваніе тепляка и не должны помѣщаться слишкомъ близко къ бетону.

Въ теплякѣ помимо возведенія кладки должно также производиться и приготовленіе бетона изъ предварительно обогрѣтыхъ материаловъ, для чего и должны быть предусмотрены въ немъ достаточныя помѣщенія. Промерзшіе или смѣшанные со снѣгомъ материалы для приготовления бетона ни въ какомъ случаѣ не допускаются.

Способы отопленія и освѣщенія тепляковъ должны обеспечивать безопасность ихъ въ пожарномъ отношеніи. Независимо отъ сего въ теплякахъ должно быть организовано постоянное дежурство сторожей, и должны всегда имѣться приспособленія для тушенія пожара и достаточный запасъ воды, а равно должно быть предупреждено загрязненіе бетонной кладки.

Прекращеніе отопленія тепляка и разборка его въ холодное время могутъ быть допускаемы лишь съ разрѣшенія Техническаго надзора.

## II. Трамбурый бетонъ.

§ 22. Бетонъ, подлежащій уплотненію трамбованіемъ, укладывается на мѣсто слоями, толщина которыхъ въ зависимости отъ степени жесткости бетона и отъ размѣровъ щебенки или зеренъ гальки и гравія должна по уплотненіи не превосходить слѣдующихъ предѣловъ:

а) въ бетонныхъ сооруженіяхъ:	
при жесткомъ бетонѣ . . . . .	20 см.
при пластичномъ бетонѣ . . . . .	25 »
б) въ железобетонныхъ сооруженіяхъ . . . . .	15 »

Слои бетона располагаются по возможности нормально къ направленію дѣйствующихъ въ сооруженіи сжимающихъ усилій и трамбуются по направленію этихъ усилій.

§ 23. Разравниваніе и трамбованіе укладываемаго бетона должно производиться такимъ образомъ, чтобы была обеспечена возможная равномерность его уплотненія. Особенное вниманіе должно быть обращено на тщательность бетонированія въ углахъ и у наружныхъ поверхностей.

Каждый слой бетона уплотняется трамбованіемъ, съ послѣдовательно перекрывающимися площадками удара трамбовокъ, до выступленія влаги на поверхности трамбуемаго бетона, но не доводя трамбованія до выступленія такъ называемаго цементнаго молока.

§ 24. Бетонированіе должно по возможности производиться безъ перерыва, такъ чтобы каждый новый слой бетона укладывался на свѣжую поверхность ранѣ положеннаго и утрамбованнаго бетона еще до его схватыванія; поверхность эту полезно предварительно взрыхлить для обеспечения большей связи между слоями бетона.

Въ случаѣ необходимости перерыва бетонированія послѣдній слой бетона долженъ быть защищенъ отъ пыли и грязи и поддерживаемъ во влажномъ состояніи. При возобновленіи работъ слѣдуетъ сначала слегка обирковать поверхность ранѣ уложеннаго и схватившагося уже бетона для приданія ей шероховатости и для лучшей связи съ новымъ слоемъ бетона, затѣмъ удалить разрыхленные части, промыть водой и смочить жидкимъ растворомъ и только послѣ этого возобновлять бетонированіе.

При кратковременномъ перерывѣ работъ, по ближайшимъ указаніямъ Техническаго надзора, можетъ быть въ исключительныхъ случаяхъ допускаемо оставленіе на время перерыва заготовленнаго, но не употребленнаго въ дѣло бетона, съ тѣмъ чтобы оставаемый бетонъ былъ защищенъ отъ вреднаго дѣйствія солнца, вѣтра, дождя и пр. и передъ подачей на мѣсто укладки, послѣ перерыва работъ, вновь былъ перемѣшанъ съ добавленіемъ воды.

Поданный на мѣсто укладки бетонъ во всякомъ случаѣ долженъ быть уложенъ и вполне утрамбованъ до перерыва работъ.

§ 25. При добавленіи въ бетонъ *отдѣльныхъ* крупныхъ камней должны быть приняты мѣры для обезпеченія плотнаго облеганія камней бетономъ, какъ, напр., употребленіе болѣе пластичнаго бетона, осаживаніе самого камня въ бетонъ трамбовками и т. п. Промежутки между отдѣльными камнями должны быть на столько значительны, чтобы была обезпечена возможность тщательнаго заполненія ихъ бетономъ и утрамбовки послѣдняго.

### III. Литой бетонъ.

§ 26. Литой бетонъ долженъ содержать такое количество воды, чтобы при достаточной его текучести сохранилась еще вязкость раствора, и не происходило разъединенія составныхъ частей бетона.

Литой бетонъ *укладывается* непрерывно слоями и уплотняется промѣшиваніемъ особыми мѣшалками (штырями); въ углахъ и у наружныхъ поверхностей полезно легкое осаживаніе его трамбовками.

При употребленіи въ дѣло литого бетона необходимо обращать особое вниманіе на равномерность распределенія его составныхъ частей.

Включеніе въ бетонъ *отдѣльныхъ* камней вѣсомъ не свыше 1 пуда допускается лишь при исполненіи массивныхъ частей сооружений изъ литого бетона.

---

# О г л а в л е н і е .

	Стр.
ПРЕДИСЛОВІЕ . . . . .	3
<b>ЧАСТЬ I. Общія физическія свойства бетона.</b>	
<b>ГЛАВА 1. Петрографія цементнаго клинкера.</b>	
§ 1. Минералы цементнаго клинкера и отвердѣвшаго цемента . . . . .	5
Минералы клинкера . . . . .	6
§ 2. Химическій составъ минераловъ клинкера . . . . .	8
§ 3. Микроскопія цементнаго клинкера и отвердѣвшаго цементнаго раствора . . . . .	10
Затвердѣвшій цементъ . . . . .	11
§ 4. Процессъ твердѣнія цемента по Тернебому . . . . .	13
<b>ГЛАВА 2. Теорія твердѣнія цементнаго раствора по Лешателье.</b>	
§ 5. Процессы въ горнѣ обжигательной печи . . . . .	14
§ 6. Теорія твердѣнія растворовъ порландъ-цемента по Лешателье . . . . .	15
<b>ГЛАВА 3. Схватываніе и твердѣніе цементнаго раствора и вліяніе различныхъ факторовъ на этотъ процессъ.</b>	
§ 7. Схватываніе и твердѣніе цементнаго раствора . . . . .	17
§ 8. Вліяніе качества воды на процессъ схватыванія цементнаго раствора . . . . .	18
§ 9. Вліяніе количества воды на процессъ схватыванія цементнаго раствора . . . . .	19
§ 10. Практическій способъ опредѣленія густоты цементнаго раствора . . . . .	20
§ 11. Опредѣленіе консистенціи цементныхъ растворовъ при помощи вспомога- тельныхъ приборовъ . . . . .	21
§ 12. Опредѣленіе количества воды для цементныхъ растворовъ посредствомъ теоретическаго разсчета . . . . .	23
§ 13. Отношеніе воды въ затвердѣвшемъ порландъ-цементѣ . . . . .	25
§ 14. Вліяніе температуры воды на схватываніе и твердѣніе цементнаго раствора . . . . .	29
<b>ГЛАВА 4. Вліяніе влажности на схватываніе и твердѣніе раствора и бетона.</b>	
§ 15. Вліяніе влажности на твердѣющіе растворы . . . . .	29
§ 16. Вліяніе влажности на твердѣющіе бетоны . . . . .	34
§ 17. Вѣроятныя причины вліянія влажности на твердѣющіе растворы и бетоны . . . . .	35
§ 18. Внутреннія напряженія въ твердѣющихъ растворахъ и бетонахъ . . . . .	36



## ГЛАВА 5. Вліяніє ви́шней температу́ры на раство́ры и бето́ны.

- |       |   |    |
|-------|---|----|
| § 19. | Вліяніє ви́шней температу́ры на раство́ры и бето́ны . . . . .                 | 39 |
| § 20. | Сравне́ніє влія́ній вла́жності и ви́шней температу́ры на раство́ры и бето́ны. | 42 |

## ГЛАВА 6. Термиче́скія свойства бето́новъ.

- |       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| § 21. | Теплопроводность . . . . . | 44 |
| § 22. | Теплоемкость . . . . .     | 44 |

## ГЛАВА 7.

- |       |  |    |
|-------|--|----|
| § 23. | Вліяніє на постоя́нство о́бъема явле́ній, происхо́дящихъ вну́три бето́на въ періо́дъ тверд́нія . . . . . | 46 |
|-------|--|----|

## ГЛАВА 8. Вліяніє моро́зовъ на раство́ры и бето́ны и су́ществую́щіє спосо́бы произво́дства бето́нной кладки въ моро́зы.

- |       |  |    |      |
|-------|--|----|------|
| § 24. | Устано́вивши́йся взгля́дъ въ нау́къ и адми́нистрати́вной практи́къ на бето́нныя рабо́ты на моро́зѣ . . . . . | 48 | Стр. |
| § 25. | Опы́тныя да́нныя о дѣ́йстви моро́зовъ на раство́ры и бето́ны . . . . .                                       | 49 |      |
| § 26. | Устано́вивши́еся въ практи́къ спосо́бы произво́дства бето́нныхъ рабо́тъ на моро́зѣ . . . . .                 | 57 |      |
| § 27. | Совме́стное влія́ніє вла́жності и моро́зовъ на бето́нныя соору́женія . . . . .                               | 58 |      |

## ГЛАВА 9. Теорія́ хи́мическихъ раство́ровъ.

- |       |  |    |
|-------|--|----|
| § 28. | Теорія́ хи́мическихъ раство́ровъ . . . . . | 61 |
|-------|--|----|

## ЧАСТЬ II. Теорія́, лабо́раторныя опы́ты и практика бето́нныхъ рабо́тъ на моро́зѣ.

### ГЛАВА 10. Теорети́ческое обоснова́ніє возмо́жности произво́дства бето́нныхъ рабо́тъ на моро́зѣ.

- |       |   |    |
|-------|---|----|
| § 29. | Аггре́гатное состо́яніє и крити́ческая то́чка во́ды . . . . .   | 65 |
| § 30. | Экзо́термичность реакці́и тверд́нія це́ментна́го раство́ра . . . . .  | 68 |
| § 31. | Крива́я тверд́нія це́ментна́го раство́ра (и бето́на) . . . . .  | 68 |
| § 32. | Тверд́ніє бето́нна́го ма́ссива на моро́зѣ . . . . .   | 69 |
| § 33. | Ядро́ тверд́нія бето́на . . . . .   | 72 |
| § 34. | Тверд́ніє бето́нна́го ма́ссива въ во́дѣ . . . . .   | 72 |
| § 35. | Тверд́ніє бето́нна́го ма́ссива на во́здухѣ при лѣ́тней температу́рѣ . . . . .                                   | 75 |
| § 36. | Сравне́ніє процессо́въ тверд́нія бето́на: на моро́зѣ, въ во́дѣ и при лѣ́тней температу́рѣ на во́здухѣ . . . . . | 77 |
| 1.    | Напра́вленіє пото́ка тепло́вой эне́ргіи . . . . .   | 77 |
| 2.    | Про́цессы въ тверд́ющемъ бето́нѣ, вызы́ваемые тепло́вымъ пото́комъ . . . . .                                    | 79 |
| 3.    | Испаре́ніє вла́ги изъ бето́на лѣ́томъ и зимо́й . . . . .  | 80 |
| 4.    | Каче́ство бето́на, сдѣ́ланна́го на моро́зѣ . . . . .  | 85 |
| § 37. | Спосо́бъ произво́дства бето́нныхъ рабо́тъ на моро́зѣ . . . . .  | 86 |
|       | Ко́личество тепло́ты, выдѣ́ляемой тверд́ющимъ це́ментомъ . . . . .  | 87 |
|       | Температу́ра составныхъ ча́стей бето́на . . . . .   | 92 |
|       | Выво́ды форму́лъ . . . . .  | 93 |
|       | Примѣ́ръ . . . . .  | 95 |

### ГЛАВА 11. Лабо́раторныя опы́ты надъ це́ментнымъ раство́ромъ съ подо́грѣтыми ма́териалами.

- |       |   |    |
|-------|---|----|
| § 38. | Характери́стика це́ментовъ, взя́тыхъ для опы́товъ . . . . . | 98 |
|       | Порту́гандъ-це́ментъ „Пу́шка“ . . . . .                     | 98 |
|       | Порту́гандъ-це́ментъ „Ска́ла“ . . . . .                     | 99 |

§ 39.	Опыты съ подогрѣтыми матеріалами . . . . .	99
	Опыты съ цементомъ „Пушка“ . . . . .	100
	Опыты съ цементомъ „Скала“ . . . . .	101

## ГЛАВА 12. Постройка желѣзобетонныхъ сооружений на морозѣ.

§ 40.	Постройка желѣзобетоннаго моста на Правобережной дорогѣ у г. КІЕВА . . . . .	
§ 41.	Постройка опоръ желѣзобетоннаго виадука черезъ пути МОСКОВСКО-КІЕВО ВОРОНЕЖСКОЙ ж. ДОРОГИ у станціи КІЕВЪ III . . . . .	
	Опыты на вліяніе низкихъ температуръ, произведенные при постройкѣ виадука . . . . .	114
§ 42.	Постройка желѣзобетонныхъ сооружений: подпорной стѣнки, двухъ лотковъ и водобойныхъ ступенекъ на Правобережной дорогѣ у г. КІЕВА . . . . .	118
	1. Постройка подпорной стѣнки . . . . .	118
	2. Постройка двухъ желѣзобетонныхъ лотковъ и водобойныхъ ступенекъ. . . . .	119
§ 43.	Постройка водопроводной галереи . . . . .	120
§ 44.	Каменная кладка на цементномъ растворѣ . . . . .	120
	Техническія условія производства бетонныхъ и желѣзобетонныхъ работъ . . . . .	121

---

---

## Сочиненія И. А. Кирѣенко.

1. Укрѣпленіе овраговъ желѣзобетонными сооруже-  
ніями. 1913 г. . . . . ц. — р. 30 к.
2. Земскіе желѣзобетонные типовые балочные  
мосты. 1914 г. . . . . ц. 10 „ — „
3. Производство желѣзобетонныхъ работъ Практиче-  
скія указанія 1915 г. . . . . ц. 1 „ — „
4. Земскія желѣзобетонныя типовыя трубы малыхъ  
діаметровъ. 1915 г. . . . . ц. 2 „ 15 „
5. Бетонныя работы на морозѣ 1919 г. . . . . ц. 12 „ — „

---

### Готовятся къ печати:

1. 2-е изданіе книги: земскіе желѣзобетонные типовые балочные  
мосты.
2. 2-е переработанное и дополненное изданіе: Укрѣпленіе овра-  
говъ желѣзобетонными сооружениями.
3. Земскіе типовые гранитные устои.
4. Желѣзобетонная набережная на анкерахъ въ городѣ Нижне-  
Днѣпровскѣ.
5. Искусственныя сооружения Правобережной дороги.
6. Постройка желѣзобетоннаго виадука на ст. Кіевъ III. М. К.-Во-  
ронезской жел. дороги.
7. Обыкновенныя дороги. Курсъ лекцій, читанныхъ въ Кіев-  
скомъ Политехническомъ Институтѣ въ 1918—19 г.





**Цѣна 12 руб.**