

620.19

л 29

Н. Л а х т и н ъ.

О В Ы В ъ Т Р И В А Н І И
КАМЕННЫХЪ
СТРОИТЕЛЬНЫХЪ МАТЕРІАЛОВЪ.

СЪ ТРЕМЯ ФОТОТИПІЯМИ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Садовая, 9.
1890.

1991

620.19
Л29

Н. Лахтинъ.

А. ЗИМОНЪ ПЕДРО-
ТУХИНСКІЙ ПЕДРОТУХИ
Дата 2007

О ВЫВѢТРИВАНІИ
КАМЕННЫХЪ
СТРОИТЕЛЬНЫХЪ МАТЕРІАЛОВЪ.

СЪ ТРЕМЯ ФОТОТИПІЯМИ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Садовая, 9.

1890.

80968

О выветриваніи каменныхъ строительныхъ матеріаловъ.

Инженера Н. К. Лахтина.

Случаи поврежденій зданій, храмовъ, дворцовъ памятниковъ, столь драгоцѣнныхъ по ихъ художественному, историческому и духовному значенію, многочисленныя поврежденія и разрушенія искусственныхъ сооружений (мостовъ, моловъ и проч.) вслѣдствіе поврежденій каменнаго матеріала, послужившаго на возведеніе сооружений, иногда стоившихъ громадныхъ затратъ государству, заставляютъ стремиться къ изученію причинъ выветриванія и разрушенія камней.

Чтобы иллюстрировать сказанное примѣрами, стоитъ напомнить о замѣченныхъ поврежденіяхъ фасада Вестминстерскаго дворца, Обелиска Тотмеса въ Нью-Йоркѣ, Александровской колонны, колоннъ Исакіевскаго собора, зданія Швейцарской Политехнической школы, многихъ надгробныхъ памятниковъ, облицовки опоръ большихъ мостовъ черезъ рѣки Цну и Оку и безчисленное множество разрушеній облицовки опоръ мостовъ, влекущее за собой довольно затруднительный ремонтъ при перемѣнѣ облицовки, иногда почти совершенно уничтоженной подъ дѣйствіемъ атмосферныхъ агентовъ.

Только тогда можно будетъ возводить сооружения съ увѣренностью въ ихъ прочности и долговѣчности, когда будутъ изучены причины, разрушающія камни, установлены точно тѣ приемы и признаки, при помощи которыхъ можно отличить камни стойкіе разрушительному дѣйствію упомянутыхъ причинъ, и, наконецъ, будутъ опредѣлены средства, которыя могутъ предупредить разрушеніе камня, остановить или даже только замедлить замѣченное уже выветриваніе камня.

Поэтому изученіе этого вопроса должно заключать въ себѣ слѣдующіе три отдѣла:

1) Опреѣленіе причинъ, вліяющихъ на вывѣтриваніе каменнаго строительнаго матеріала въ связи съ его строеніемъ и составными элементами горной породы матеріала.

2) Опреѣленіе признаковъ породъ и сортовъ камня, страдающихъ и не страдающихъ отъ дѣйствія атмосферныхъ дѣятелей, и установка опытовъ, при помощи которыхъ можно убѣдиться въ стойкости камней разрушающему дѣйствию атмосферы.

3) Описаніе средствъ и составовъ, предупреждающихъ и останавливающихъ вывѣтриваніе камней.

Предметомъ настоящей статьи будетъ отдѣлъ первый и отчасти второй; по первому отдѣлу собраны и сопоставлены свѣдѣнія, разбросанныя въ сочиненіяхъ, рассматривающихъ вывѣтриваніе камней, или только попутно, или съ точки зрѣнія геологическихъ процессовъ, а также изъ отрывочныхъ замѣтокъ, попадающихся въ журналахъ.

Изложивъ суть вопроса и намѣтивъ отчасти программу изложенія, перейдемъ къ рассмотрѣнію причинъ вывѣтриванія камней.

Химическіе, физическіе и механическіе дѣятели могутъ производить въ каменныхъ сооруженіяхъ болѣе или менѣе глубокія и поверхностныя поврежденія, ведущія сооруженія къ совершенному или только къ поверхностному разстройству.

Къ механическимъ дѣятелямъ относятся тѣ силы, на противодѣйствіе которымъ рассчитано данное сооруженіе, напр., опрокидывающее дѣйствіе вѣтра на маяки и высокіе мостовыя опоры, ударъ волнъ о волноломъ и т. д. и тѣ усилія, которыя вызываются въ частяхъ сооруженія подъ дѣйствіемъ внѣшнихъ силъ, напр., распоръ свода, давленіе фермы на подферменный камень и давленіе послѣдняго на кладку мостовой опоры и проч.

Измѣненія температуры, выщелачивающее дѣйствіе воды, замерзаніе воды въ скважинахъ камня, дѣйствіе газовъ, растворенныхъ въ атмосферныхъ осадкахъ, дѣйствіе растительности, появляющейся на камняхъ, относятся къ дѣятелямъ химическимъ и физическимъ. Разрушеніе камня, вызванное этими дѣятелями, называется его *вывѣтриваніемъ*.

Не входя здѣсь въ рассмотрѣніе вліянія механическихъ дѣятелей на камни, надо замѣтить, что вывѣтриваніе камня должно въ сильной степени зависѣть отъ напряженій, вызванныхъ въ камнѣ механическими дѣятелями. Поэтому, лабораторные опыты, ограничиваю-

щієся преимущественно одностороннимъ изученіємъ вывѣтриванія камней безъ участія механическихъ дѣятелей, не могутъ дать полного представленія о разрушаемости камней подъ совокупнымъ дѣйствіемъ всѣхъ причинъ, обуславливающихъ разрушеніе камня въ строительной практикѣ.

Вывѣтриваніе камней, какъ сказано выше, вызывается растворяющимъ дѣйствіемъ воды на камни, дѣйствіемъ газовъ, растворенныхъ въ атмосферныхъ осадкахъ, растительностью, появляющеюся на камняхъ, переѣнами температуры и замерзаніемъ воды въ скважинахъ камня. Разсмотримъ дѣйствіе каждой изъ упомянутыхъ причинъ на камни въ отдѣльности.

Атмосферные осадки содержатъ въ себѣ небольшое количество углекислоты, кислорода и азота воздуха, кромѣ того, въ густо населенныхъ мѣстностяхъ, въ промышленныхъ городахъ, гдѣ много фабрикъ, атмосферные осадки увлекаютъ съ собою сѣрнистый ангидридъ и сѣрководородъ, являющіеся продуктомъ сжиганія каменнаго угля и свѣтильнаго газа. Изъ всѣхъ перечисленныхъ газовъ, поглощенныхъ водою, наибольшее вліяніе на камни принадлежитъ углекислотѣ, сѣрнистому ангидриду и сѣрководороду. Кислородъ принимаетъ значительно меньше участія въ превращеніяхъ, происходящихъ въ камняхъ, чѣмъ это можно было бы ожидать. Азотъ же совершенно не играетъ никакой роли, не считая ничтожнаго содержанія въ атмосферныхъ осадкахъ азотной кислоты, образующейся изъ кислорода и азота воздуха въ присутствіи паровъ воды подъ дѣйствіемъ атмосфернаго электричества.

Вода, проникая въ камни, можетъ превращать безводные минералы въ гидраты. Особенно важныя послѣдствія имѣетъ подобный переходъ при превращеніи ангидрита въ гипсъ, т. е. безводный сѣрнокислый кальцій переходитъ въ водный, соединяясь съ 25% воды по вѣсу. При благопріятныхъ условіяхъ, процессъ этотъ происходитъ очень быстро; такъ въ отвалахъ рудника въ кантонѣ Валлисъ, близъ Бекса куски ангидрита начинаютъ обращаться въ гипсъ по прошествіи 8 дней. Стѣны штолень, проведенныхъ въ ангидритѣ, отъ поглощенія воды разбухаютъ настолько, что штольни приходится расширять время отъ времени.

Гипсъ, въ свою очередь можетъ быть растворимъ водою, такъ что другія породы, сцементированныя имъ, распадаются. Пре-

краснымъ примѣромъ подобнаго разрушенія камня отъ выщелачиванія гипса служить, описанный въ книгѣ „Механическая Лабораторія 1875—1886 г.“, „Жайскій песчаникъ, мѣсторожденіе котораго находится въ имѣніи Жайскомъ бар. Вольфа, Муромскаго уѣзда, Владимирской губерніи въ крутомъ берегу Оки. Жайскій песчаникъ свѣтло-краснаго цвѣта съ крапинками, представляетъ глинистый песчаникъ, проникнутый гипсомъ. Сложеніе мелкозернистое. При обработкѣ соляной кислотой даетъ въ нерастворимомъ осадкѣ 66% кремнезема и 3% глинозема; растворимое главнымъ образомъ состоитъ изъ гипса и небольшого количества окиси желѣза. При опредѣленіи насыщенія камня, было обнаружено уменьшеніе его въ вѣсѣ и, наконецъ, очень значительное уменьшеніе объема камня вслѣдствіе растворенія *) гипса и черезъ то отмываніе песчинокъ“.

Растворяющее дѣйствіе воды значительно увеличивается какъ по силѣ, такъ и по числу растворяемыхъ минераловъ, когда вода заключаетъ въ себѣ углекислоту. При этомъ, силикаты извести, магнезій, кали, натра, закиси желѣза и марганца растворяются при обыкновенной температурѣ, освобождая кремнеземъ и образуя карбонаты основаній силикатовъ. Силикаты же глинозема остаются безъ измѣненія. Песчаникъ, сцементированный известью, рассыпается, когда выщелачивается известь, цементирующая зерна кварца. Дождевая вода содержитъ въ себѣ воздуха до $\frac{1}{20}$ своего объема, причемъ, по Бауметеру, воздухъ, содержащійся въ водѣ, имѣетъ углекислоты въ 33 раза болѣе, чѣмъ воздухъ атмосферы **). Проникающая въ почву вода обогащается углекислотой, такъ какъ, по опытамъ Буссенго и Леви, воздухъ, проникающій въ почву, заключаетъ въ себѣ въ 200 разъ болѣе углекислоты, чѣмъ въ атмосферѣ.

Такому обильному содержанію углекислоты въ грунтовой водѣ можно приписать особенно быстрое и сильное разрушеніе близко лежащихъ къ землѣ частей каменныхъ построекъ. При этомъ, однако, не слѣдуетъ упускать изъ виду разрушающую, непреодолимую силу кристаллизаціи въ камняхъ солей ***) растворенныхъ въ грунтовой водѣ.

Слѣдующее мѣсто за углекислотой, по своему вліянію на камни,

*) Одна часть гипса растворяется въ 460 частяхъ воды.

**) Въ атмосферномъ воздухѣ 0,042% CO_2 .

***) Селитра, морскія соли.

занимають сѣрнистый ангидридъ и сѣроводородъ, растворенные въ водѣ и придающіе ей кислую реакцію. Въ большихъ промышленныхъ центрахъ и городахъ атмосферные осадки увлекаютъ съ собою сѣрнистый ангидридъ, продуктъ сжиганія каменнаго угля, и сѣроводородъ, результатъ сгорания свѣтильнаго газа. По изслѣдованіямъ доктора Ангуса Смита воздухъ въ Манчестрѣ среднимъ числомъ содержитъ на 1000000 частей 1 часть сѣрной кислоты; въ центрѣ города на тоже количество воздуха приходится до 25 частей сѣрной кислоты. Сѣрная кислота превращаетъ углекислые кальцій и магній (известняки и доломиты) въ растворимые и отличающіеся большимъ количествомъ кристаллизационной воды сѣрнокислые, вслѣдствіе чего разрушеніе камней происходитъ и отъ растворенія, и отъ механическаго дѣйствія кристаллизующихся сѣрнокислыхъ солей кальція и магнія ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ и $MgSO_4 \cdot 7H_2O$).

Поврежденіе фасада зданія англійскаго парламента (Вестминстерскаго дворца) можетъ быть объяснено, какъ результатъ только что описанныхъ процессовъ.

Для реставрированія зданія парламента послѣ перваго разрушенія его отъ вывѣтриванія камней, вызвавшаго рядъ научныхъ обсужденій, рѣшено было руководствоваться при выборѣ камня наблюденіями надъ состояніемъ камня въ карьерахъ и въ другихъ постройкахъ просуществовавшихъ долгое время безъ всякихъ поврежденій. Коммиссія остановилась на нѣкоторыхъ доломитовыхъ породахъ, изъ которыхъ зданіе парламента и было построено. Но черезъ 7 — 8 лѣтъ по окончаніи постройки начали показываться признаки разрушенія, начиная съ мѣстъ, наиболѣе закрытыхъ, мало доступныхъ свободному дѣйствию атмосферы, но доступныхъ сырости, стекающей и застаивающейся водѣ. Такъ въ наружныхъ частяхъ фасада между верхнимъ и нижнимъ гзимсами плинта и ниже перваго карниза въ менѣе выступающихъ частяхъ появлялся бѣлый замѣтный налетъ сѣрнокислаго магнія, сопровождаемый разслоеніемъ камня. Въ сказанныя мѣста сырость проникала дѣйствиемъ волосности изъ капельника гзимса и превращала доломитъ въ гипсъ и сѣрнокислый магній подѣ дѣйствиемъ находящейся въ атмосферныхъ осадкахъ сѣрной кислоты, затѣмъ растворяла эти соли, которыя кристаллизуются разрушали, разслаивали камень. Желая объяснить причину, почему доломитъ, начавшій видимо разрушаться черезъ 7 — 8 лѣтъ въ зданіи парламента,

сохранялся долгое время вполне хорошо въ другихъ постройкахъ, надо предположить, что эти хорошо сохранившіяся зданія находятся въ мѣстности, менѣе населенной и менѣе промышленной, а, о карьерахъ и говорить нечего.

Сѣрнистые металлы, встрѣчающіеся въ видѣ включеній въ камняхъ, подѣ дѣйствіемъ воды, окисляясь, переходятъ въ сѣрно-кислыя соединенія, которыя въ свою очередь нерѣдко снова разлагаются отъ дѣйствія воды, содержащей углекислоту въ растворѣ, причемъ образуются углекислыя окиси тяжелыхъ металловъ, а щелочи переходятъ въ сѣрнокислыя соли, частью растворимыя, о чемъ уже сказано было выше. Иногда сѣрнистые металлы изъ сѣрно-кислыхъ соединеній обращаются прямо въ водные окислы. Примѣромъ этому можетъ служить сѣрный колчеданъ (FeS_2), превращающійся сначала въ желѣзный купоросъ ($Fe_2SO_4 + 7H_2O$), а потомъ переходящій въ бурый желѣзнякъ ($2Fe_2O_3 + 3H_2O$). *) Процессы эти сопровождаются увеличеніемъ объема упомянутыхъ включеній и бурой окраской въ видѣ потоковъ снаружи камня. Камень при этомъ покрывается трещинками, увеличивающимися въ послѣдствіи отъ дѣйствія только что разсмотрѣннаго процесса и другихъ причинъ. Подобное разрушеніе наблюдается въ Рускольскомъ **) мраморѣ, употребленномъ на облицовку стѣнъ Исаакіевскаго собора. При ремонтѣ облицовки, куски мрамора, подвергшіеся разрушенію отъ разложенія включеній сѣрнаго колчедана, замѣняются новыми кусками.

Указавъ на нѣкоторыя химическія причины разрушенія камней, упомянемъ о дѣйствіи растительности, которая разрушаетъ камни двояко: механически, распирая своими корнями трещины камня, и химически, выдѣлая кислоты, дѣйствіе которыхъ на камни уже разсмотрѣно. Иногда, въ присутствіи сырости, даже на гладкой поверхности известняковъ и другихъ породъ камней, особенно содержащихъ известь и кали, появляются пылеобразныя, бурія, желтыя, сѣрыя и черныя пятна. Пятна эти образуются отъ появленія на камняхъ микроскопическихъ лишайевъ *Liprariae*, *Variolariae*, *Verrucaria*, *Parmelia*, *Collema* и друг., съ развитіемъ которыхъ камень становится неровнымъ,

*) Освобождающаяся при этомъ сѣрная кислота, въ свою очередь, дѣйствуетъ разрушительно на камни.

**) Рускіялы—Финляндія не далеко отъ Сердоболя.

шероховатымъ, трещиноватымъ и рыхлымъ, а въ углубленіяхъ образуется землистый порошокъ камня.

Корни живыхъ лишаяевъ выдѣляютъ щавелевую кислоту, *) а при гніеніи лишаяевъ при доступѣ воздуха, образуется углекислота и гуминовая кислота **), которая, соединяясь съ основаніями, образуетъ соли, частью растворимыя. Особенною растворимостью отличаются гуминовыя соли щелочей, дѣйствующія очень разрушительно на камни. Зенфтъ наблюдалъ при превращеніи растений въ гумусъ, образование сѣроводорода, газообразнаго фосфористаго водорода, сѣрнистаго углерода и соединеній, аналогичныхъ таниновой кислотѣ, которыя помимо гумуса могутъ разлагать камни. Покрышка камня изъ лишаяевъ, умѣряя колебаніе температуры, увеличиваетъ влажность, которая въ присутствіи углекислоты, еще болѣе усиливаетъ разрушеніе камня.

Изъ отжившихъ лишаяевъ образуется нѣкоторый слой почвы при попадающей одновременно съ этимъ пылью изъ атмосферы. Этотъ слой почвы, удерживая еще болѣе влаги, содѣйствуетъ произрастанію, сначала мховъ, а потомъ разныхъ растений. Корни растений, распространяясь, не только по поверхности, но и проникая въ камень, дѣйствуютъ подобно клиньямы; камень покрывается трещинами, въ которыя проникаютъ кислоты и корни растений. Такимъ образомъ камень разрушается постепенно и, наконецъ, распадается на куски. Такое разрушеніе наблюдается наиболѣе часто въ нѣкоторыхъ известковыхъ породахъ камней.

Переходимъ теперь къ разсмотрѣнію разрушенія камней отъ вліянія колебаній температуры. Коэффициенты линейнаго измѣненія камней въ зависимости отъ температуры очень невелики (едва достигаютъ пятаго десятичнаго знака), тѣмъ не менѣе, результаты этихъ измѣненій могутъ быть вполне замѣтными. Мари указываетъ въ своемъ курсѣ на выстроенный въ теплое время бассейнъ, который зимой давалъ трещины по швамъ, вслѣдствіе сжатія камней, а къ теплomu времени становился снова непроницаемъ для воды. Разные кристаллы измѣняютъ свои размѣры отъ колебанія температуры различно и не-

*) На мраморѣ Парфенона въ Афинахъ наблюдается образованіе инкрустацій толщиною около 2 мм. минерала тиршита (щавелевокислая известь), образованіе котораго приписывается особаго рода растительности, появляющейся на мраморѣ.

***) *Senft*. Deutsche geol. Gesellschaft XIII стр. 665.

одинаково по разнымъ направлѣнїямъ, какъ показаль это Митчерлихъ. Такъ, слюда и полевої шпатъ измѣняютъ свои размѣры отъ температуры крайне неодинаково. Извесковый шпатъ, при нагрѣванїи, расширяясь по направлѣнїю главной оси, сжимается по направлѣнїю боковыхъ осей. Въ этомъ свойствѣ кристалловъ должна заключаться причина быстрого разстройства Финляндскаго гранита раппа-киви, состоящаго изъ крупныхъ кристалловъ ортоклаза (вершковъ до трехъ) окруженныхъ зеленой каймой оликоглаза, изъ черной слюды, кварца и роговой обманки. Подъ дѣйствиємъ рѣзкихъ перемѣнъ температуры этотъ гранитъ покрывается сѣткой безконечно малыхъ трещинокъ, служащихъ залогомъ дальнѣйшему разрушенїю вслѣдствїе многихъ причинъ. Колонны Александровская и Исаакїевскаго собора, сдѣланныя изъ раппа-киви служатъ этому прекраснѣйшимъ примѣромъ. Подобное же разрушенїе гранита описываетъ Gobin въ „La Nature“. Онъ говоритъ, что быстрая и сильная перемѣна температуры служить причиной вывѣтриванїя камней. Гранитный крестъ въ Saint Paule de Mons въ Haute Loire (климатъ холодный безъ тумановъ) поставленный согласно надписи на немъ въ 1670 году, вывѣтрился со стороны, нагрѣваемой солнцемъ, сторона же креста, не нагрѣваемая солнцемъ, осталась вполнѣ цѣла.

Чѣмъ порода камня мелкозернистѣе, однороднѣе и плотнѣе, тѣмъ колебанїя температуры окажутъ менѣе вредное дѣйствиє. Сланцеватое сложенїе породы замедляетъ вывѣтриванїе, поэтому гнейсъ вывѣтривается труднѣе гранита. Напротивъ, крупнокристаллическое и крупнозернистое сложенїе породы и не однородный составъ ея ускоряютъ вывѣтриванїе.

Разрушенїя камней, вслѣдствїе разсмотрѣнныхъ выше причинъ, значительно уступаютъ по силѣ и быстротѣ наступающаго разрушенїя, вызваннаго замерзанїемъ воды, находящейся въ скважинахъ камня. Поэтому, при выборѣ камня на постройку, должно обращать особое вниманїе на способность камня противостоятъ разрушающему дѣйствию мороза. Можно указать на множество примѣровъ разрушенїя построекъ, вслѣдствїе неудачнаго выбора камня. Такъ, въ началѣ постройки Самаро-Уфимской дороги въ одномъ изъ среднихъ ея участковъ облицовка устоевъ небольшихъ мостиковъ и трубъ была сдѣлана изъ прекраснаго бѣлаго известняка довольно плотнаго и легко поддающагося обработкѣ. Первая же зима привела облицовку этихъ сооружений къ полному разрушенїю, такъ что пришлось сооруженїя перестраивать вновь.

Вода, заключающаяся въ скважинахъ камней, замерзая, увеличивается съ необыкновенной силой на $\frac{1}{11}$ (по Гюмбелю) своего объема и при этомъ, раздвигая частицы камня, разрушаетъ его. Скважины эти могутъ быть или естественныя, присущія данной породѣ камня, или уже какъ результатъ одного изъ упомянутыхъ выше видовъ разрушенія камня.

Вода, заключающаяся въ скважинахъ камня, можетъ быть или карьерная, т. е. находившаяся въ камнѣ до извлеченія его изъ горы, или поглощенная камнемъ уже въ послѣдствіи. Количество карьерной воды очень различно и зависитъ отъ свойства камня; количество это, колеблясь, по Делессу, между нѣсколькими десятими процента (для гранита крупно-зернистаго—0,37%) и до 40% для рухляковъ почти равно количеству поглощаемой воды камнями при опытныхъ опредѣленіяхъ *) насыщенности камня. По вынутіи изъ горы, камень долженъ остаться нѣкоторое время на воздухѣ, чтобы карьерная вода испарилась; извѣстно, что добытые камни зимою, когда карьерная вода не испарилась, трескаются отъ мороза; при этомъ соли, растворенныя въ карьерной водѣ, могутъ дѣйствовать различно: иногда задерживать замерзаніе воды, иногда, напротивъ, ускорять (охлаждающія смѣси).

При испареніи карьерной воды, вещества, растворенныя въ ней (кремнекислота и соли), выдѣляются и заполняютъ поры камня или вступаютъ въ соединеніе съ веществомъ камня, при этомъ камень становится тверже, прочнѣе и возможность поврежденія его отъ мороза значительно уменьшается, а выдѣлившіяся вещества, при по-

*) Для опредѣленія насыщенности камня поступаютъ такъ: измѣренный и взвѣшенный воздушно-сухой кубикъ изъ камня погружаютъ въ воду на нѣсколько миллиметровъ и затѣмъ продолжаютъ его постепенно, въ теченіи нѣсколькихъ часовъ погружать все глубже. При такомъ погруженіи вода проникаетъ постепенно въ камень и вытѣсняетъ воздухъ, не образуя въ немъ воздушныхъ пузырьковъ и не оставляя сухихъ, ненасыщенныхъ мѣстъ. Когда камень погруженъ весь въ воду, тогда его взвѣшиваютъ черезъ нѣкоторые промежутки времени (черезъ день, два) до полнаго прекращенія увеличенія его въ вѣсѣ. Если G вѣсъ сухаго образца, а G' вѣсъ насыщеннаго, то насыщеніе камня въ процентахъ на единицу вѣса будетъ $S_g = \frac{G' - G}{G} \times 100$, а насыщеніе въ единицахъ объема $S_v = S_g \times g$, гдѣ g — вѣсъ куб. см. камня въ грам., т. е. въ 100 единицахъ объема пустотъ находится S_v единицъ объема.

слѣдующихъ насыщеніяхъ камня водой, уже вновь не столь легко растворимы.

Особенно разрушительно на камни дѣйствуютъ чередующіяся рѣзкія переменны температуры въ присутствіи влаги, тѣмъ болѣе, что вода, какъ это доказалъ Минарь непосредственными опытами, выступая изъ камня во время сильныхъ морозовъ, сопровождаемыхъ сухой погодой, можетъ быть снова имъ поглощена и, замерзая, произвести его разрушеніе. Когда послѣ сильныхъ холодовъ наступаетъ оттепель, и повышеніе температуры совершается быстро, тогда воздухъ становится очень влаженъ, и на поверхности стѣны появляется вода въ видѣ бѣлаго мохообразнаго налета, которая потомъ замерзаетъ въ ледяную кору. При этомъ наружныя части стѣны оказываются теплѣе внутреннихъ, которыя сохранили еще прежнюю болѣе низкую температуру. Болѣе высокая температура проникаетъ внутрь стѣны постепенно, и, вмѣстѣ съ постепеннымъ повышеніемъ температуры внутреннихъ частей стѣны, влага проникаетъ все глубже и глубже. Такое проникновеніе влаги въ камень происходитъ періодически, такъ какъ вмѣстѣ съ суточными колебаніями температуры (днемъ теплѣе, а ночью холоднѣе) происходятъ временныя замерзанія воды, вступившей въ стѣну. Это періодическое замерзаніе воды содѣйствуетъ болѣе глубокому прониканію влаги внутрь камня, причемъ вода, замерзая каждый разъ, увеличиваетъ трещинки, которыя только послѣ оттаиванія становятся воспріимчивѣе къ дальнѣйшему своему увеличенію.

Переходимъ теперь къ описанію видовъ разрушенія камня отъ дѣйствія мороза.

Брардъ указываетъ на слѣдующіе три вида разрушенія камней:

1) *Неправильными угловатыми осколками* разрушаются плотныя полевые шпаты, содержащіе известь и имѣющіе на поверхности желтыя или сѣрыя полосы по разнымъ направленіямъ.

2) *Слоями болѣе или менѣе тонкими и пластинками* разрушаются известняки, содержащіе глину и способные давать трещины (обладающіе спайностью) рухляковые сланцы и песчаники, содержащіе слюду.

3) *Зернами болѣе или менѣе мелкими* разрушаются крупно и мелкозернистыя известняки, нѣкоторые виды гранита и, особенно, песчаника.

Брардъ, указывая виды разрушенія камней отъ мороза, свойственные разнымъ породамъ камней, не говоритъ, однако, этимъ, что перечисленныя породы камней непременно должны страдать отъ дѣйствія мороза.

Приведемъ примѣры *) типичныхъ разрушеній камней отъ дѣйствія мороза.

а) Известнякъ ровнаго бѣлаго цвѣта, неплотнаго сложенія треснулъ на двѣ части и окрашился по ребрамъ и угламъ (рис. 1)**).

Грубый известнякъ сѣраго цвѣта съ глинистыми включеніями и прослойками треснулъ по прослойкѣ и крошится (рис. 2).

Известковый сланецъ чернаго цвѣта плотнаго сложенія послѣ 14 замораживаній разрушился по спайности на нѣсколько частей, что видно на рис. 3.

б) Въ известнякахъ средней плотности, розоватомъ (рис. 4), сѣроватомъ (рис. 5) и сѣромъ (рис. 6) съ глинистыми прослойками обнаружилось поврежденіе по гранямъ параллельно поверхности залеганія камня въ горѣ.

с) Известнякъ плотный, очень мелко-раковистый (рис. 7), желтоватаго цвѣта далъ трещину послѣ *многократныхъ* замораживаній.

д) Раковисто-оолитовый известнякъ (рис. 8) окрошился по ребрамъ и угламъ.

е) Плотный известнякъ сѣроватаго цвѣта (рис. 9) съ сѣрыми жилками далъ рѣдко наблюдаемая выкалыванія въ видѣ небольшихъ ямокъ (а и б).

і) Иностранные песчаники, употребленные на облицовку двухъ прекрасныхъ зданій въ Петербургѣ (на набережной Невы (1886 г.) и на Большой Морской (1887 г.)), съ примѣсью блестокъ слюды, одинъ (рис. 10), окрашенный окисью желѣза въ красно-бурый цвѣтъ, а другой (рис. 11) сѣраго цвѣта—крошатся по ребрамъ и угламъ.

Вывести опредѣленное заключеніе: какія породы камней болѣе

*) Изъ многочисленныхъ опытовъ на замораживаніе камней, производящихся въ Механической Лабораторіи Института Инженеровъ Путей Сообщенія.

***) Фотографическіе снимки съ камней, пострадавшихъ отъ мороза, исполнены въ Фотографической Лабораторіи Института Инженеровъ Путей Сообщенія.

подвергаются разрушенію отъ мороза, и какія свойства породъ наиболѣе этому способствуютъ—до сихъ поръ на удалось. Такъ, нѣкоторые изъ оолитовыхъ известняковъ прекрасно сопротивляются дѣйствию мороза, тогда какъ другіе разрушаются чрезвычайно быстро. Точно также не удалось найти опредѣленной зависимости между пористостью камня и его способностью сопротивляться дѣйствию мороза. Одни изъ пористыхъ камней легко подвергаются разрушенію, другіе, напротивъ, совершенно не страдаютъ отъ мороза.

Впрочемъ, характеръ пористости камня отражается на его стойкости дѣйствию низкой температуры. Когда поры распределены въ камнѣ болѣе или менѣе равномерно внутри и у поверхности, тогда вода, расширяясь при замерзаніи, имѣетъ возможность выступать наружу сквозь поры, не разрушая камень; напротивъ, когда поры и пустоты (каверны) находятся внутри довольно плотнаго камня и не имѣютъ выходовъ наружу, тогда вода, попавшая въ эти пустоты вслѣдствіе волосности разрушаетъ камень, не имѣя мѣста для своего расширенія при замерзаніи. Одинаковую роль съ пустотами могутъ играть въ этомъ случаѣ песчано-глинистыя включенія и прослойки, проводящія воду въ камень, на подобіе дренажа; при этомъ вліяніе включеній и прослоекъ отражаются сильнѣе вліянія пустотъ, такъ какъ песчано-глинистыя включенія, проводя воду, препятствуютъ, однако, расширенію воды при замерзаніи.

Попытки найти способы, при помощи которыхъ можно было бы убѣдиться въ стойкости камней разрушающему дѣйствию мороза, не прибѣгая къ опытамъ на непосредственное замораживаніе камней и не вдаваясь въ разсмотрѣніе свойствъ камней, способствующихъ разрушенію, не привели къ точнымъ и удовлетворительнымъ результатамъ.

Брардъ предложилъ замѣнить дѣвствіе кристаллизаціи воды на камни при обращеніи ея въ ледъ какой нибудь солью, не дѣвствующею на камни и кристаллизація которой происходитъ быстро и энергично. Такими свойствами обладаетъ глауберова соль (сѣрно-кислый натрій). Сѣрно-кислый натрій, при нагрѣваніи съ водою выше 33° С, даетъ пресыщенный растворъ, изъ котораго образуются кристаллы тенардита (безводный сѣрно-кислый натрій, кристаллизующійся въ ромбической системѣ). Изъ раствора же, температура котораго ниже 33° С., кристаллизуется водный сѣрно-кислый натрій (глауберова соль) въ одно-клиномѣрной системѣ. По Брарду, дѣвствіе кристаллизаціи тенар-

дита сильнѣе мороза, а дѣйствіе кристаллизаціи глауберовой соли равно по силѣ послѣднему.

Поэтому, опытъ производится такъ: готовятъ 50% растворъ глауберовой соли въ водѣ при 15° С, кипятятъ его, опускаютъ въ кипящій растворъ камни, приготовленные въ видѣ кубиковъ по 5 см. въ сторонѣ, и продолжаютъ кипяченіе съ камнями около получаса. Затѣмъ камни вынимаютъ и подвѣшиваютъ на ниткѣ, подставивъ подъ каждый камень стаканъ съ растворомъ въ которомъ кипятили камни. На поверхности камня, по его охлажденіи, начинаютъ обра-

Порода камня.	Способъ Брарда.	Способъ непосредственнаго замораживанія.	Примѣчаніе.
Трахитовый туфъ.	Грани кубика покрылись сѣтью трещинъ, но ребра и углы остались почти неповрежденными.	Послѣ 5 замораживаній наблюдается сильное отслаиваніе по гранямъ; ребра и углы сильно крошатся.	Результаты испытаній по способу Брарда не столь рельефны, какъ при непосредственномъ замораживаніи; продолжительность опыта, при непосредственномъ замораживаніи, ограничивается въ приведенныхъ случаяхъ 2—3 днями, а по способу Брарда не менѣе 5 дней.
Гатчинскій известковистый песчаникъ.	На граняхъ появились едва замѣтныя выкрашиванія въ видѣ маленькихъ язвенокъ.	Послѣ 3-хъ замораживаній началъ сильно разрушаться.	
Пористый известнякъ.	Видимыхъ повреждений нѣтъ, но въ растворѣ замѣчается муть.	Послѣ 4-хъ замораживаній наблюдается выкрашиваніе на граняхъ.	
Плотный известнякъ.	Никакихъ признаковъ повреждений не замѣчено.	Послѣ 13 замораживаній началъ сильно крошиться по угламъ.	

зовываться кристаллы, которые смываютъ по временамъ, погружая камень въ подставленный подъ него стаканъ съ растворомъ. Брардъ утверждаетъ, что если камень страдаетъ отъ мороза, то это обнару-

жится дней черезъ пять, и что ни одинъ известнякъ не выдерживаетъ подобное испытаніе, продолженное 20 дней.

При этихъ опытахъ совѣтуется каждый разъ вмѣстѣ съ испытываемыми камнями подвергать тому же испытанію одинъ камень, безусловно не страдающій отъ мороза, а другой безусловно страдающій. Многіе и, между прочимъ, Нивуа утверждаютъ, что способъ Брарда не приводитъ къ точнымъ результатамъ и что существуютъ примѣры камней, выдержавшихъ съ успѣхомъ это испытаніе, но совершенно разрушившихся отъ дѣйствія мороза. Для сравненія способа Брарда съ непосредственнымъ замораживаніемъ камней составителемъ этой статьи было сдѣлано нѣсколько параллельныхъ опытовъ, результаты которыхъ помѣщены въ приведенной таблицѣ.

Браунъ пытался дѣлать заключенія о стойкости камней разрушающему дѣйствию мороза изъ сравненія временнаго сопротивленія камней разрыву и работы, производимой насыщающей камень водой при ея замерзаніи. Усиліе, вызванное увеличеніемъ объема воды, при ея замерзаніи, можно разсматривать, какъ нѣкоторое усиліе, разрывающее камень. Зная, съ одной стороны, временное сопротивленіе камня разрыву, опредѣляемое опытомъ, и его абсолютную пористость, т. е. объемъ всѣхъ пустотъ камня, а съ другой стороны зная, что одинъ килограммъ воды, замерзая, производитъ работу въ 33680 килограммометровъ, можно придти къ заключенію о сопротивленіи камня дѣйствию мороза.

Браунъ пришелъ къ слѣдующему уравненію:

$$\left[(1 - C_1 + C_2) \right] R \cong \underset{\leq}{\geq} 33,68 S,$$

гдѣ R — временное сопротивленіе камня насыщеннаго водой разрыву (кил. на кв. см.)

C_1 — коэффициентъ безопасности $\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{20} \right)$, въ виду нарушенія свойствъ матеріала за предѣломъ упругости

C_2 — коэффициентъ Годкинсона около $\frac{1}{3}$, въ виду неоднородности камней и возможныхъ неточностей опыта въ зависимости отъ способа дѣйствія силы и проч.

S — насыщеніе камня въ грам.

$$S = \frac{\text{вѣсъ насыщеннаго} - \text{вѣсъ сухаго}}{\text{объемъ}} \frac{\text{грам.}}{\text{см.}^3}$$

33,68 — работа одного грамма воды при замерзаніи.

Если лѣвая часть уравненія больше или равна правой, то камень не разрушится отъ дѣйствія мороза, если же меньше, то камень долженъ пострадать отъ мороза. Такова попытка Брауна разрѣшить эту задачу, но Дебовъ, по причинѣ многихъ неточностей и неопредѣленностей, не видитъ въ этой теоріи рѣшенія занимающаго насъ вопроса. Вслѣдствіе неудовлетворительности описанныхъ выше попытокъ найти способъ убѣдиться въ стойкости камней разрушительному дѣйствию мороза и отсутствія признаковъ, по которымъ можно было бы отличать камни, могущіе пострадать отъ мороза, приходится прибѣгать каждый разъ къ непосредственнымъ опытамъ на замораживаніе камней; камень предварительно насыщается водой и затѣмъ подвергается замораживанію. Насыщеніе камня водой должно производиться крайне осторожно, неторопливо, погружая камень въ воду постепенно, и должно продолжаться до совершеннаго прекращенія увеличенія вѣса камня отъ впитыванія воды. Въ противномъ случаѣ, въ камнѣ можетъ остаться воздухъ и ненасыщенные части камня, дающія ошибку въ величинѣ насыщенія камня до 4%. Для скорости процесса насыщенія можно примѣнять воздушный насосъ, при помощи котораго разрѣшается воздухъ, заключенный въ камнѣ, и постепенно замѣщается водою.

Послѣ насыщенія, камни подвергаются послѣдовательнымъ замораживаніямъ и оттаиваніямъ 25 разъ, какъ это принято на конференціяхъ по однообразному испытанію строительныхъ матеріаловъ (Мюнхенъ — Дрезденъ).

Въ Механической Лабораторіи Института Инженеровъ Путей Сообщенія завѣдывающимъ ею проф. Н. А. Бѣлелюбскимъ устроенъ приборъ для искусственнаго замораживанія камней. Въ деревянный большой ящикъ вставляется меньшій деревянный, обитый внутри цинкомъ ящикъ, въ который вставляется еще меньшій цинковый ящикъ; между первымъ и вторымъ находятся древесныя опилки, а между вторымъ и третьимъ охлаждающая смѣсь. Во второй ящикъ плотно вставляется невысокій цинковый съ охлаждающей смѣсью ящикъ, который плотно закрываетъ третій (цинковый)

ящикъ. Все накрывается цинковой крышкою, засыпается опилками и закрывается деревянною крышкою.

Охлаждающая смѣсь составляется изъ льда и поваренной соли, взятыхъ въ отношеніи 2 : 1. Такая смѣсь въ теченіи 2—3 дней поддерживаетъ температуру до $-17^{\circ} C$, послѣ чего температура постепенно повышается и къ 4—5 дню доходить до $-10^{\circ} C$, послѣ чего охлаждающая смѣсь возобновляется. Смѣсь, составленная изъ 3 или 4 частей льда на 1 часть соли, понижаетъ температуру не ниже $-15, -16^{\circ} C$ но сохраняется не столь продолжительное время.

Камни помѣщаются въ цинковый ящикъ вмѣстѣ съ термометромъ maxima-minima Сикса часа на 3—4, послѣ чего они вынимаются и погружаются въ воду обыкновенной комнатной температуры часа на два, а затѣмъ могутъ быть снова положены въ ящикъ для замораживанія.

Термометръ Сикса имѣетъ слѣдующее устройство: на дощечкѣ съ двумя шкалами помѣщена изогнутая стеклянная трубка со столбикомъ ртути и съ двумя резервуарами по концамъ, однимъ большимъ и длиннымъ, наполненнымъ алкоголемъ и другимъ меньшимъ круглымъ, наполненнымъ парами алкоголя. Въ трубку вложены два желѣзныхъ указателя, которые предъ наблюденіемъ подводятся къ поверхности ртути. При пониженіи температуры, алкоголь сжимается въ длинномъ большемъ резервуарѣ, и ртуть подается въ его сторону; наоборотъ, при повышеніи температуры алкоголь расширяется, передвигаетъ столбикъ ртути въ сторону меньшаго резервуара и сжимаетъ въ немъ пары алкоголя.

При производствѣ испытанія камней дѣйствіемъ низкой температуры, существенно наблюдать, чтобы камни подвергались охлажденію никакъ не выше $-10^{\circ} C$, и чтобы температура, хотя по временамъ понижалась до $-17^{\circ} C$, такъ какъ по опытамъ Сорби, вода въ капиллярныхъ трубкахъ и скважинахъ замерзаетъ только при $-17^{\circ} C$ и даже $-20^{\circ} C$, такъ что вода въ камняхъ можетъ остаться, не обращаясь въ ледъ и при температурѣ ниже 0° , что можетъ привести къ неправильнымъ заключеніямъ.

Облицовка моста у Боррезъ, сохранявшаяся въ теченіе 10 лѣтъ безъ всякихъ поврежденій, покрылась трещинами вслѣдъ за первой оттепелью, послѣ холодной суровой зимы, въ теченіе которой температура доходила до $-22^{\circ} C$.

Въ заключеніе описанія дѣйствія мороза на каменный строитель-

ный материалъ должно замѣтить, что благопріятные результаты опытовъ даже при непосредственномъ замораживаніи камней, не могутъ служить безусловной гарантіей за полное сопротивленіе камней дѣйствію мороза въ томъ случаѣ, когда камень еще подверженъ вліянію механическихъ дѣятелей. Единственно довольно затруднительные для выполненія опыты послѣдовательныхъ замораживаній и оттаиваній камня, на который постоянно дѣйствуетъ нѣкоторая сжимающая его сила, могутъ дать вѣрную оцѣнку.

Вывѣтриваніе камня, подѣ дѣйствіемъ всѣхъ разсмотрѣнныхъ выше причинъ, можетъ происходить или крайне медленно или, напротивъ, чрезвычайно быстро. Лаландъ указываетъ на интересный примѣръ разрушенія сооруженія отъ вывѣтриванія камней. Отъ прекрасной церкви въ Бошервиль въ Нормандіи, построенной въ срединѣ XI вѣка остался черезъ 800 лѣтъ одинъ фундаментъ. Въ нашемъ климатѣ песчаникъ разрушается на $\frac{1}{3}$ " въ теченіи 40 лѣтъ, а на поверхности гранитовъ *) въ 15—20 лѣтъ образуются слѣды разрушенія (Александровская колонна и колонны Исаакіевскаго собора).

Не слѣдуетъ, однако, изъ приведенныхъ примѣровъ дѣлать заключенія, что нѣтъ камня, сопротивляющагося съ успѣхомъ всѣмъ разрушающимъ причинамъ. Примѣры хорошо сохранившихся породъ камней могутъ быть приведены въ большомъ числѣ. Такъ: Шокшенскій песчаникъ (памятникъ Николаю I), Сердобольскій гранитъ (колонны у Конногвардейскаго бульвара, Каріадиты подѣ Эрмитажнымъ балкономъ и опоры Николаевскаго моста), красный египетскій гранитъ (сфинксы съ плинтусами на набережной Невы), Шведскій Эльфдальскій порфиръ (ваза въ Лѣтнемъ саду) и множество разныхъ другихъ породъ: песчаникъ (каровскій, котельничскій и др.), известняки (ревельскій мраморовидный, жигулевскій, царево-курганскій и др.), употребленные на разныя постройки.

*) Разрушеніе гранита, какъ это можно иногда наблюдать, начинается съ вывѣтриванія роговой обманки, которая покрывается зеленымъ порошкомъ (глауконитомъ), частью растворяемымъ, частью увлекаемымъ механически атмосферными осадками. Гранитъ покрывается язвинками въ мѣстахъ, гдѣ роговая обманка находится на его поверхности. Язвинки эти, въ свою очередь, содѣйствуютъ дальнѣйшему болѣе быстрому и сильному разрушенію породы. Подобное разрушеніе я наблюдалъ въ Павловскѣ въ колоннахъ (съ южной ихъ стороны) портика памятника Императору Павлу, сдѣланныхъ изъ Финляндскаго гранита.

При выборѣ камня на постройку и при испытаніяхъ каменныхъ строительныхъ матеріаловъ, всегда слѣдуетъ имѣть въ виду тѣ климатическія и другія условія, въ которыхъ будетъ находиться камень. Прекраснымъ примѣромъ этого можетъ служить обелискъ изъ сіенитогранита въ 70 футовъ высотой и покрытый іероглифами, поставленный въ Геліополисѣ во время царствованія Египетскаго царя Тотмеса. Обелискъ сдѣланъ изъ монолита, выломаннаго въ 1560 году до Р. Х. въ знаменитыхъ камеломняхъ Сіены (Ассуанъ) въ верхнемъ Египтѣ. При римскихъ императорахъ въ 22 году до Р. Х. онъ перевезенъ въ Александрію и установленъ въ храмѣ Цезаря. Въ 1877 году бывшій хедивъ Египта Измаиль-Паша подарилъ обелискъ Сѣверо-Американскимъ Соединеннымъ Штатамъ, куда онъ перевезенъ въ 1880 году и установленъ въ Нью-Йоркѣ. Черезъ нѣкоторое время обнаружены были признаки вывѣтриванія камня, особенно съ западной стороны, стороны господствующихъ вѣтровъ. При освидѣтельствованіи оказалось возможнымъ отдѣлить большіе куски камня, и всего собрано 870 фунтовъ. Наблюденія надъ насыщеніемъ показали, что подвѣтренная сторона обелиска поглощаетъ воды въ 6 разъ болѣе другихъ сторонъ.

Ограничиваясь краткимъ разсмотрѣніемъ причинъ разрушенія сооруженийъ, связанныхъ съ вывѣтриваніемъ камней и не вдаваясь въ чрезмѣрныя подробности, чтобы не затемнить ими главнаго, мы далеко не считаемъ этимъ очеркомъ исчерпаннымъ интересующій насъ вопросъ, но надѣемся, что изъ появляющихся въ литературѣ по этому предмету статей въ связи съ накопленіемъ опытныхъ данныхъ можно будетъ придти къ выясненію признаковъ породъ, наиболѣе подвергающихся разрушенію отъ вывѣтриванія, и найти быстрый и точный способъ отличать породы и сорта камней, наиболѣе стойкіе разрушающему дѣйствию атмосферныхъ дѣятелей.

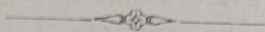




Рис. 1.



Рис. 8.



Рис. 3.

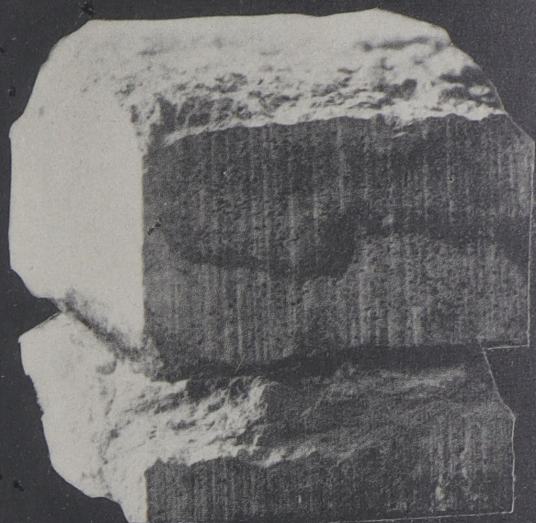


Рис. 2.



Рис. 5.

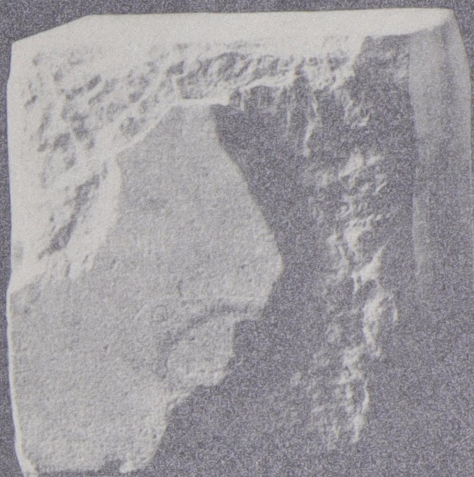


Рис. 6.



Рис. 11.



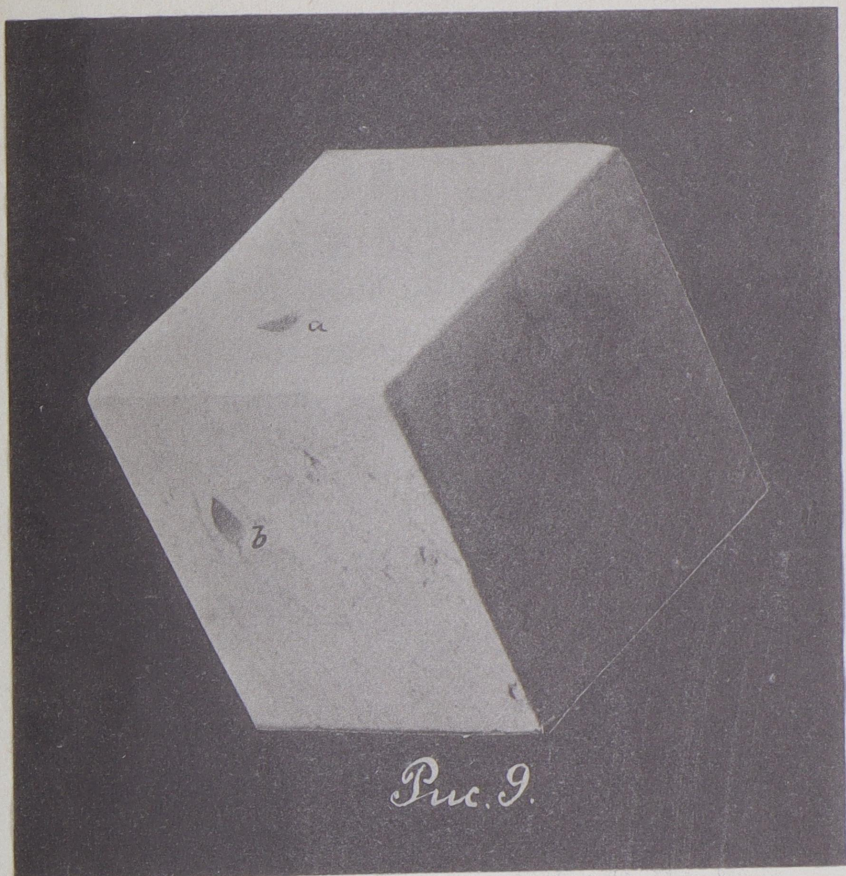


Рис. 9.

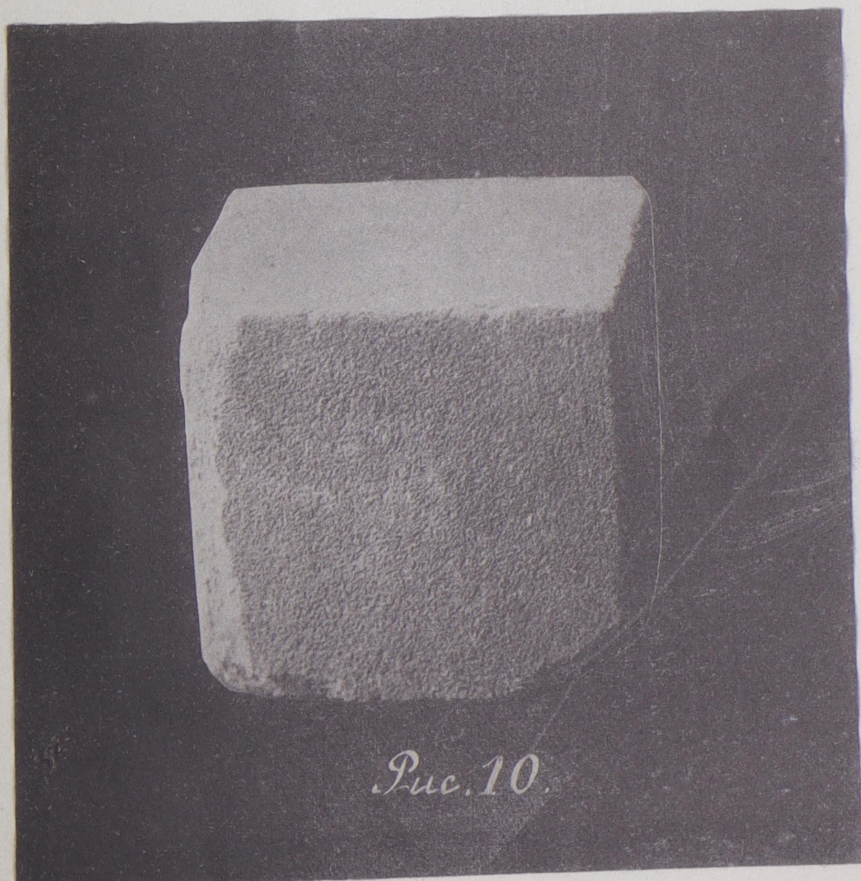


Рис. 10.