

ИССЛЕДОВАНИЯ

**КАМЕННЫЕ
КОНСТРУКЦИИ**

С. 193

МОСКВА — 1955

Проф. Б. В. ЗАЛЕССКИЙ
и научн. сотр. К. П. ФЛОРЕНСКИЙ

О НЕКОТОРЫХ ПРИНЦИПАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Испытания естественного строительного камня на морозостойкость проводятся в нашей стране уже свыше 100 лет. Следует отметить, что в 1886 г. на Дрезденской международной конференции по испытаниям строительных материалов известным русским ученым Н. А. Белелюбским был предложен метод определения морозостойкости путем 25-кратного попеременного замораживания при температуре -17° в «ящике мороза» и оттаивания. С тех пор эта методика, вполне оправдавшая себя в условиях строительства того времени, не претерпела больших изменений. Все варианты ее сводились к изменениям количества циклов, температуры замораживания, продолжительности выдерживания при отрицательных температурах и продолжительности оттаивания.

Были попытки заменить испытание морозостойкости испытанием материала при резком изменении температуры (метод инж. М. А. Обухова) или при воздействии кристаллизации солей и фазовых их превращений в порах материала на его прочность (американский метод испытания серноокислым натрием).

Следует упомянуть также о предложении Гиршвальда характеризовать так называемую «теоретическую морозостойкость» отношением «коэффициента размокания» V и «коэффициента насыщения» S . Под первым подразумевается отношение прочности при сжатии насыщенных водой образцов к прочности сухих образцов, а под вторым — отношение «свободного» насыщения водой, достигаемого постепенным погружением образца в воду в течение 3 суток, к «принудительному» насыщению, создаваемому выдерживанием образца в вакууме водоструйного насоса, заливкой его под этим вакуумом водой и затем повышением давления на воду до 150 атм. Однако исследования Б. В. Залесского, А. И. Корсунского и В. В. Лапина (1941 г.) показали, что отношение свободного насыщения к принудительному не представляет собой определенной величины, так как свободное насыщение водой во многих случаях не прекращается

в установленные этим методом сроки, а продолжает повышаться неопределенное время.

При оценке поведения камня в сооружениях, т. е. его долговечности, надо принимать во внимание, конечно, не одно только разрушение от замораживания и отдельные составляющие его процессы, а весь комплекс явлений, происходящих в камне и влияющих так или иначе на его долговечность; к таким явлениям в первую очередь следует отнести, например, процесс сульфатного выветривания, возникающий или под влиянием подсосывания грунтовых вод, или при воздействии атмосферы промышленных городов¹.

Таким образом, разрушение от замораживания выделено в самостоятельное и главенствующее явление в основном по методическим соображениям, и этого нельзя забывать при оценке истинной долговечности камня. Необходимо учитывать также и другие факторы, влияющие на процесс разрушения камня, как, например, состав и структуру камня (в частности, степень его однородности).

Работы лаборатории Института геологических наук Академии наук СССР над каменными материалами, предназначенными для применения в бетоне (в частности, над карбонатными породами Самарской Луки), опубликованные в трудах этого института и в сборнике, посвященном юбилею проф. В. Н. Юнга, показывают влияние структурных факторов на прочность и стойкость камня и бетона. Для бетона учтено влияние различия между коэффициентами линейного расширения заполнителя и цементного камня.

Процессы разрушения камня сложны, поэтому методика испытания требует значительного углубления и совершенствования. Представляется, что развитие этой методики должно идти по трем направлениям: 1) натурные наблюдения и обследования, 2) моделирование процессов разрушения камня и 3) изучение отдельных факторов и явлений, лежащих в основе происходящих процессов разрушения. Данная статья посвящена только методике испытания на морозостойкость и представляет попытку обобщить часть работ лаборатории физико-механических испытаний камня Института геологических наук и Института геохимии и аналитической химии имени акад. В. И. Вернадского, посвященных вопросам стойкости камня в условиях службы их в наземных сооружениях, и литературный материал по данному вопросу.

Актуальность рассматриваемых в статье вопросов определяется резко возрастающей потребностью в естественном строительном камне для гигантских работ по реконструкции и строительству городов, а также для возведения гидротехнических

¹ Этому вопросу посвящены работы лабораторий Института геологических наук и Института геохимии и аналитической химии Академии наук СССР.

сооружений. Этим оправдывается постановка нами некоторых проблемных и дискуссионных вопросов, в решении которых на- зрела практическая необходимость.

Несмотря на то, что наблюдения, положенные в основу нашего исследования, проводились в основном на подмосковных карбо- натных породах, можно считать, что физические процессы, про- исходящие при замораживании воды в камне, в общем типичны для многих каменных строительных материалов.

При применении местных и новых строительных материалов, еще недостаточно зарекомендовавших себя с практической сто- роны, обычно совершенно четко ставится вопрос о требуемых механических свойствах камня, но очень приближенно ре- шается вопрос о его стойкости во времени в конкретных усло- виях службы сооружения.

Можно считать бесспорным, что правильность существующих стандартных испытаний камня на долговечность уже давно вы- зывает сомнения. Между тем проекты новых технических усло- вий и стандартов принципиально мало отличаются от устарев- ших, что вызывается отставанием теоретических представлений о действительном механизме разрушения пород.

Морозостойкость каменного материала является одним из важнейших условий его долговечности, однако лабораторное испытание на морозостойкость, хотя и производится каждый раз в течение длительного времени, все же не дает достаточно на- дежных результатов для оценки долговечности камня в соору- жении, особенно в различных климатических условиях. Причина этого заключается в том, что разрушение от замораживания яв- ляется весьма сложным явлением, а это не учитывается при многих лабораторных исследованиях долговечности материала.

Разрушение камня от действия мороза вызывается двумя причинами.

Первой причиной является действие внутренних напряжений, возникающих вследствие различия коэффициентов объемного расширения минералов, слагающих данный материал, или вследствие резко неодинаковых температур в различных слоях камня при его внезапном охлаждении. Разрушения такого типа в естественных условиях наблюдаются в пустынных и высокогор- ных местностях с резко континентальным климатом и высокой степенью солнечного облучения. Такие разрушения наблюдают- ся чаще всего в плотных породах, отличающихся высокой хруп- костью и редко используемых в качестве строительных материа- лов. В обычном континентальном климате этот тип разрушения может играть лишь второстепенную роль и не рассматриваться нами при обычных условиях службы камня.

Второй причиной, значительно более важной, является раз- рушающее действие воды, находящейся в порах камня, при за- мерзании. Можно считать установленным, что абсолютно сухих тел в естественном их состоянии вообще не существует. Вода в

том или ином виде является необходимым компонентом всякой природной системы. Количество воды, заключенной в горных породах, огромно.

Классификация находящейся в породах воды достаточно подробно разработана применительно к почвам, и здесь нет надобности на ней останавливаться. Отметим лишь некоторые характерные свойства воды, содержащейся в породе и вызывающей разрушение при замерзании.

Вода кристаллогидратов обычно не участвует в процессах замораживания, но может приводить к серьезным разрушениям породы, если кристаллогидрат образует несколько форм с различным содержанием кристаллизационной воды, т. е. если эти несколько форм обладают различным молекулярным объемом и точки перехода их находятся в обычных условиях температуры и влажности. В качестве примера можно указать на $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, система которого хорошо изучена и разрушающее действие которого общеизвестно¹.

Гигроскопическая и пленочная вода покрывает поверхность всех частиц камня пленкой, представляющей собой от одного до нескольких сот молекулярных слоев и обычно имеющей толщину порядка $n \cdot 10^{-6} \div 10^{-4}$ мм. Вода, повибрированно, находится в очень уплотненном состоянии, под давлением десятков тысяч $\text{кг}/\text{см}^2$, имеет повышенный удельный вес (1,28—2,45 по разным определениям) и не участвует в обычных процессах замораживания, но создает дополнительный резерв влажности, могущий доходить до 10% влагоемкости камня. Количество этой воды зависит от упругости паров воды в окружающей атмосфере, и она может постепенно переходить в капиллярную воду. Последние следы гигроскопической воды удаляются с чрезвычайным трудом при температуре в несколько сот градусов.

Капиллярно связанная вода в разных формах имеет решающее значение в процессах разрушения от замораживания. Она частично подчиняется обычным законам действия силы тяжести, медленно перемещается в камне и часто находится под отрицательным давлением. Капиллярно связанная вода обычно преобладает над другими типами воды, ее количество резко меняется в зависимости от условий, в которых находится порода, и эта вода может полностью насытить поры камня.

При капиллярном подсосе водой заполняются в первую очередь более широкие капилляры вследствие большей скорости движения воды по ним. В результате защемления пузырьков

¹ Здесь уместно еще раз указать на так называемое «сульфатное выветривание», которое, как показывают наши наблюдения, встречается очень часто во многих старых сооружениях и роль которого явно недооценивается, разрушения, вызываемые им, часто относят к явлениям разрушения от замораживания.

воздуха, например в подмосковных известняках, имеющих пористость 12—25%, и вследствие капиллярного подсоса заполняется водой обычно около 50—60% объема всех пор. В дальнейшем вода перераспределяется таким образом, чтобы мениски ее в капиллярах имели одинаковую, наибольшую кривизну; вода стремится заполнить наиболее узкие поры.

Таким образом, при одной и той же влажности распределение воды по порам породы может быть резко различным в зависимости от условий насыщения водой и от близости к равновесному состоянию.

Температура замерзания воды в капиллярах зависит от их диаметра и обычно лежит ниже 0°. Однако не вполне ясно, определяется ли при этом истинная равновесная температура замерзания воды или это связано с переохлаждением ее и малым вероятием образования кристаллического зародыша льда в объеме капилляра. Наблюдения над процессом таяния льда в порах говорят скорее в пользу первого предположения. По данным Н. А. Цитовича (1945—1947 г.), при менее низких отрицательных температурах глинистых грунтов и глин содержание жидкой воды в них увеличивается. Так, в бентоните при повышении температуры от —15 до —4° количество жидкой воды повысилось от 37,7 до 48% по отношению к общей влажности грунта 44%. Грунты вечной мерзлоты имеют от 19 до 35% незамерзшей воды, несмотря на чрезвычайно длительный период действия низких температур.

Весьма показательными являются опыты Томаса (1938 г.) по определению относительного количества воды, переходящей в лед при равных условиях замораживания породы, но при разной степени насыщения породы водой. Так, при —5° и при 100%-ном насыщении известняка водой превратилось в лед 99,2% всей воды, а при 10%-ном насыщении лишь — 86,7%. Это объясняется распределением воды по узким капиллярам при неполном насыщении породы.

Несомненное значение переохлаждения видно из тех опытов, при которых наблюдается различие между температурой замораживания и таяния льда в порах породы. В черепице вода замерзла через несколько часов при температуре —5,1°, а растаяла при —1°. Большая часть воды в разных опытах растаяла при температуре примерно около —2,5°, тогда как для превращения всей воды в лед в плотных черепицах требуется температура до —10°, а в известняках — около —6° (по данным Томаса, 1938 г.).

Т. Ф. Боровик-Романова, М. И. Сумгин и др.¹ проводили опыты по замораживанию воды в стеклянных капиллярах, тон-

¹ Библиография, включающая все работы, упоминаемые в тексте и не указанные в списке литературы, имеется в книгах Б. П. Вейнберга [2], Н. П. Быкова и П. Н. Каптерева [1].

ких пленках и т. д. Эти опыты лишь подтвердили, что замерзание воды в малых объемах зависит от ряда факторов, но не вскрыли причин этого явления. Необходимо, однако, отметить, что температура замерзания воды в порах не остается постоянной в пределах всего цикла многократных замораживаний. В опытах Быкова глина с влажностью 18,4% при первом охлаждении замерзла при $-1,145^{\circ}$, а при четвертом — уже при $-0,620^{\circ}$. После перемешивания всей массы температура замерзания снова понижалась до $-1,235^{\circ}$.

Лилиенталь указывает, что в трубках, в которых произошла кристаллизация воды, после расплавления образовавшегося в них льда вода значительно более склонна к самопроизвольной кристаллизации и в таких трубках нельзя добиться переохлаждения воды. В черепице, насыщенной до 100% пористости и охлажденной до $-5,9^{\circ}$, при первом охлаждении превратилось в лед всего 15,5% воды, а после 25 циклов замораживания и оттаивания при температуре -5° было обнаружено 92% льда. В известняке, насыщенном водой до 73% пористости, при первом охлаждении до -5° в лед перешло 57,6% воды, при третьем — 81,9%, а при десятом — 90,2% всей воды (по данным Томаса, 1938 г.).

Для понимания указанного явления мыслимы три процесса, которые могут иметь место в разных случаях и приводить к аналогичным результатам:

1) в рыхлых породах (глинах) при замерзании происходит значительное нарушение однородной структуры и образование ледяных (при оттаивании — водных) прослоек, которые и будут в дальнейшем замерзать значительно легче;

2) при неполном насыщении породы водой и образовании льда в широких капиллярах по ним будет происходить перегруппировка воды вследствие меньшей упругости пара над льдом, чем над переохлажденной водой. Процесс обратного перераспределения воды по узким капиллярам может идти не до конца в зависимости от продолжительности оттаивания породы;

3) после таяния льда в воде капилляров при отсутствии конвекции могут некоторое время сохраняться «обломки пространственной решетки» льда, облегчающие последующую кристаллизацию (предположение Б. П. Вейнберга, 1940 г.).

Из изложенных выше данных видно, что равновесные условия замерзания воды в капиллярах весьма сложны и еще не изучены. Поэтому при определении условий замораживания и оттаивания пород при замерзании нельзя брать произвольно продолжительность протекания того или иного процесса, а необходимо выбор ее обосновать.

В опытах В. Я. Степанова¹ с известняками основная масса

¹ Института геологических наук и Института геохимии и аналитической химии.

воды в кубике размерами $5 \times 5 \times 5$ см переходила в лед уже при температуре выше -3° в течение 2 час. При дальнейшем охлаждении на каждые 5° температура кубика понижалась ступенчато, выравниваясь с температурой шкафа обычно за 10 мин. Иногда же период выравнивания температуры увеличивался до 20 мин., что можно объяснить замерзанием оставшихся частей воды. Оттаивание охлажденного до -18° кубика в воде комнатной температуры происходило за 10—15 мин., но при этом не было ясно, с каким характером группировки молекул жидкой воды мы имеем дело.

Относительно давлений, которые может производить свободно растущий кристалл льда, существуют различные мнения. Экспериментальные работы по определению давления свободно растущих кристаллов в водных растворах дают ничтожные величины. А. В. Шубников (1935 г.) определяет давление кристалла кварца в размере $0,4$ г/см². Н. П. Быков и П. Н. Каптерев (1940 г.) не наблюдали никакого отклонения двух свободно висящих рядом в воде стальных шариков, обрастающих льдом, что также подтверждает ничтожность возникающих давлений. Теоретическое представление о том, что кристаллизационное давление должно равняться сумме поверхностных натяжений на границах кристалл — жидкость и жидкость — сосуд, также говорит о незначительности возникающих сил.

Нам кажется, что давление, вызываемое свободным ростом кристалла, во всяком случае не может быть выше предела упругости его. Для монокристалла льда Б. П. Вейнберг определяет предел упругости $0,44—0,57$ кг/см², а для зернистого льда — даже лишь $0,09$ кг/см². Одностороннее давление льда вследствие его пластичности и текучести, тесно связанных с явлениями режеляции, не может быть высоким. Другие величины известны из опытов Тэбера (1930 г.), который на основании силы замерзания льда допускает давление до 14 кг/см² и объясняет это силами направленной кристаллизации; такая величина давления также достаточно далека от предела прочности строительных материалов.

При замерзании воды в замкнутой системе могут возникать гидростатические давления совершенно других величин — до 2115 кг/см² при температуре -22° . Дальнейшее понижение температуры не увеличивает возникающих при этом давлений.

Таким образом, очевидно, что основное разрушение породы при замерзании вызывается не односторонним давлением растущего кристалла льда, а гидростатическим давлением, возникающим при изменении объема системы вода — лед в замкнутом или полузамкнутом пространстве.

Равновесная точка системы вода — лед при повышении давления понижается, причем до давления в несколько сот атмосфер это понижение идет почти равномерно, приблизительно на $0,0075^\circ$ на каждую атмосферу. Если образующаяся вода выте-

кает, точка замерзания понижается значительно больше, до $0,09^\circ$ на одну атмосферу (Финдлей, 1932 г.). Немедленно после снятия давления, например, после вытекания избытка воды, она снова смерзается, вследствие чего меняется форма ледяного тела, которое перетекает в область пониженных давлений. Это явление называется режелаяцией (Вейнберг, 1940 г.).

При переходе воды в лед объем системы вода — лед увеличивается приблизительно на 9%. При этом, если имеется свободное пространство, куда может выдавливать образующийся при замерзании излишек воды, гидростатическое давление не возникает. В опыте Н. П. Быкова и П. Н. Каптерева в стеклянный стакан с замерзающей водой помещался воздушный колокол из воронки с запаянным кончиком, куда и выдавливалась избыточная вода; благодаря этому стакан не трескался при замерзании воды. Такую же роль амортизаторов давлений играют пузырьки воздуха в порах породы, не полностью насыщенной водой. Объем этих «запасных резервуаров», необходимых для снятия гидростатического давления при замерзании, теоретически должен быть не менее 9% объема воды.

Отношение пор, заполненных водой, к общей пористости камня условимся называть степенью его насыщения водой, а степень насыщения, при которой начинает проявляться разрушающее действие воды при замерзании, — критической степенью насыщения. Практически оказывается, что критическая степень насыщения для большинства пористых камней приблизительно лежит в пределах 75 — 80%.

При равномерном насыщении водой ниже критической степени насыщения суммарный эффект возрастания внутреннего давления в порах породы не проявляется, и общий объем породы с водой и воздухом при замерзании не увеличивается, а даже несколько уменьшается. Это происходит оттого, что в таких условиях преобладает обычное сжатие породы при охлаждении, может быть даже повышенное вследствие уменьшения объема льда при температуре ниже точки замерзания, так как температурный коэффициент объемного расширения льда (около $15 \cdot 8 \cdot 10^{-5}$) значительно выше среднего коэффициента расширения пород ($6 \cdot 10^{-6} \div 8 \cdot 10^{-6}$).

При равномерном насыщении водой выше критической степени насыщения как обычная деформация, так и потеря прочности породы резко возрастают (Б. В. Залесский, В. Я. Степанов, К. П. Флоренский, 1950 г.). По данным Томаса, среднее понижение модуля упругости 10 пористых камней после одного быстрого замораживания при -6° было: при насыщении 80% — 2%, при насыщении 90% — 15% и при насыщении 100% — 42%.

Рассматривая семейство кривых, выражающих зависимость между степенью насыщения породы и снижением модуля упругости, а следовательно, и потерей прочности при замораживании различных материалов (рис. 1), можно видеть, что некоторые

из них почти прямолинейны, а другие имеют более или менее ясно выраженный излом. Теоретически истинная зависимость выражается, вероятно, кривой, приближающейся по форме к вытянутой букве S или значку интеграла. Во всяком случае ясно, что сравнение истинной морозостойкости двух пород возможно только при равных (или приведенных) условиях насыщения водой.

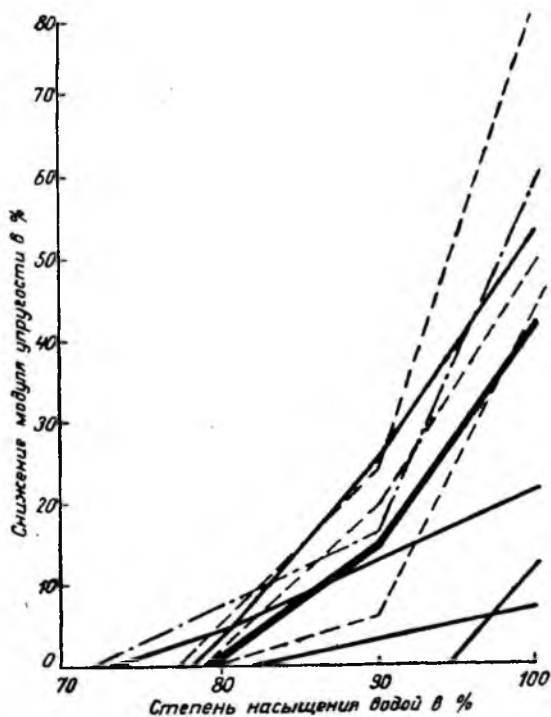


Рис. 1. Потеря упругих свойств различными строительными материалами при замораживании в зависимости от степени насыщения водой (по данным Томаса). Жирной линией показана средняя кривая

Формула выраженной в процентах приведенной морозостойкости, принятая нами в предыдущих работах, а именно:

$$\text{приведенная степень разрушения} = \frac{\text{степень разрушения}}{\text{степень насыщения}} \cdot 100,$$

безусловно является лишь грубо приближенной. Однако эта формула все же позволяет выявить ряд закономерностей, которые не видны при обычном сравнении морозостойкости без учета степени насыщения водой.

Практическая степень насыщения водой подмосковных известняков, которой можно достичь при стандартных методах

испытания, приближается к степени насыщения при капиллярном подсосе и для большинства образцов колеблется в пределах 50 — 80% (рис. 2). Рациональной методикой насыщения пород водой с применением вакуума удается повысить степень насыщения до 97 — 100%, но это достигается лишь с трудом, и можно думать, что такое насыщение камня в условиях службы в надземных сооружениях бывает редко.

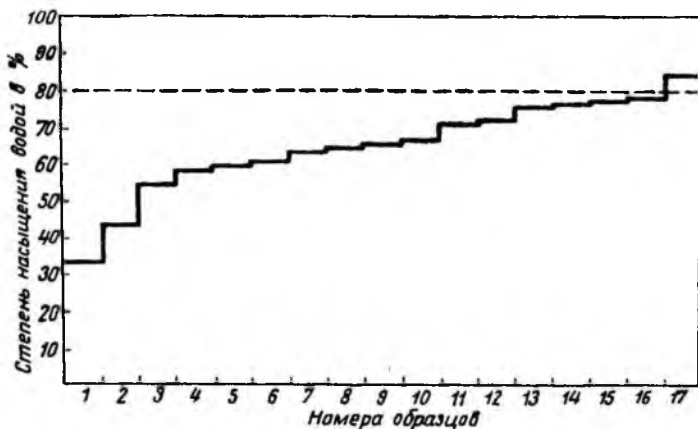


Рис. 2. Степень насыщения известняков водой при стандартных испытаниях на морозостойкость

Однако при неполном насыщении водой камня в целом степень насыщения поверхностных его слоев сравнительно легко достигает величин, превышающих критическую степень насыщения.

Как уже отмечалось выше, вода, попавшая в камень, не остается там неподвижной, а мигрирует в теле камня в зависимости от внешних условий. В случае одностороннего охлаждения при работе камня в конструкции или при температурном градиенте у поверхности камня во время его замораживания в качестве образца особенно большое значение приобретает процесс миграции воды к охлаждаемой поверхности. В данной статье мы не имеем возможности разобрать детально физическую сущность процесса, отметим только, что он может протекать как в парообразной фазе, в виде конденсации на холодной поверхности, так и в жидкой фазе вследствие изменения физических свойств воды (например, поверхностного натяжения) с изменением температуры.

Процесс миграции воды к охлажденной поверхности протекает достаточно быстро и может для отдельных зон давать степень насыщения, значительно превышающую критическую. В одном образце известняка, после одностороннего охлаждения

в течение трех суток при исходной степени насыщения 78,4%, оказалось, что степень насыщения охлаждаемой стороны достигла 93,4%, а степень насыщения противоположной стороны упала до 48,4% (рис. 3). При таких условиях часть льда может свободно выделяться на поверхности образца и при проведении многократных циклов замораживания и оттаивания постоянно образовывать резерв влаги, приводящий к дальнейшему насыщению водой поверхностных слоев охлаждаемой стороны камня. Такие же результаты для рыхлых пород были получены, например, Н. П. Быковым и П. Н. Каптеровым (1940 г.) и рядом других исследователей.

Таким образом, в процессе многократного замораживания образцов не полностью насыщенного водой камня мы фактически имеем не одну и ту же степень насыщения, которую можно контролировать и весовым методом, а постепенное возрастание степени насыщения наружных слоев образца. Это приводит к тому, что различные циклы замораживания становятся неравноценными, так как они фактически ведутся при неодинаковых условиях. Циклы оттаивания не ведут к полному восстановлению первоначального распределения влажности, так как процесс миграции воды при этом носит совершенно иной характер. Ясно, что при длительном замораживании и оттаивании может существенно измениться характер распределения воды в образце.

Фактическая степень насыщения поверхностных слоев камня в сооружении и мощность насыщающей зоны зависят от следующих факторов:

- 1) общего запаса капиллярной воды в теле камня (даже при малой влажности) и скорости пополнения его;
- 2) равновесия между процессами миграции воды к охлажден-

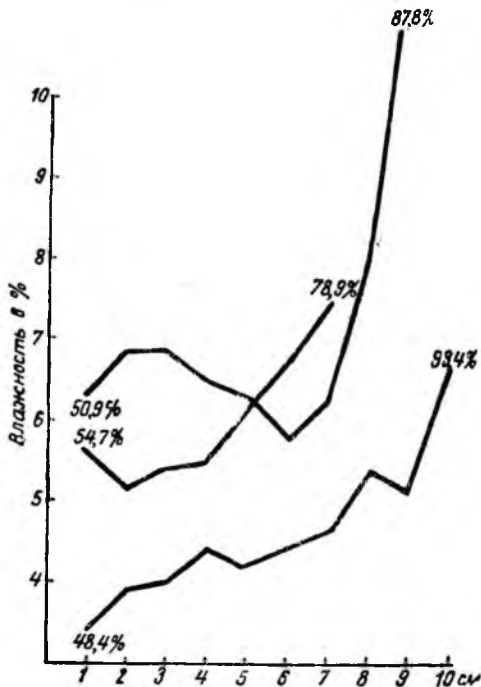


Рис. 3. Распределение влажности в образце после одностороннего охлаждения в течение 3 суток. По оси абсцисс отложена длина участка образца по направлению от теплого к охлажденному концу

даемой стороне камня и испарения воды или сублимации с поверхности;

3) числа циклов замораживания и оттаивания и относительной длительности этих процессов.

При этом, если скорость перемещения воды превысит скорость ее испарения, то на некоторой глубине от поверхности будет создаваться более или менее тонкий слой, насыщенный водой до высокой степени, не ограниченной капиллярным насыщением. Вероятно, аналогичные условия мы имеем в вечно мерзлых грунтах, где часто создается даже значительное переувлажнение почвы льдом, так как частицы грунта способны перемещаться и объем образующегося льда не ограничен первоначальной пористостью породы.

Нам неизвестны прямые определения послойной влажности камня в сооружениях в разное время года, но самый факт повышенной влажности поверхностных слоев стен не вызывает сомнений, особенно если учесть наружное увлажнение стен, которое резко замедляет процесс осушки камня путем испарения.

Интересно отметить, что разрушение камня от мороза в сооружениях обычно наблюдается или в зоне капиллярного подсоса воды, или в местах, где вода имеет возможность застаиваться и глубоко впитываться в камень. Поверхностное увлажнение гладких стен, например, косым дождем, редко приводит к разрушению камня, так как вода не проникает в него глубоко и не может создать достаточного резерва влаги, чтобы превысить критическую степень насыщения камня водой.

Если рассматривать процесс замораживания во времени, то становится ясным, что этот процесс, начиная от охлаждаемой поверхности камня, постепенно распространяется внутрь камня, т. е. что до полного промораживания камня имеется определенный градиент температуры, зависящий от скорости охлаждения.

Если процесс кристаллизации протекает без переохлаждения воды и достаточно медленно, то возникающие при увеличении объема замерзающей воды местные давления успевают уравновеситься вследствие выдавливания избытка воды через непромерзшие еще поры и выдавливания избыточного объема льда на поверхности образца и внутрь его по направлениям наименьшего сопротивления.

При температуре, весьма близкой к 0° , и при достаточно продолжительном воздействии этой температуры вследствие явлений режеляции и пластичности льда требуются лишь незначительные давления, чтобы вызвать такую перегруппировку системы вода — лед — воздух, которая будет отвечать наименьшим внутренним напряжениям этой системы. Однако по мере ускорения процесса замерзания напряжения, необходимые для уравновешивания возникающих давлений, возрастают очень резко.

Если процесс замерзания воды в порах происходит при достаточном переохлаждении или просто с большей скоростью, то возникающие при этом напряжения легко могут превысить предел прочности вещества камня и вызвать его разрушение. Наблюдая, например, в dilatометре изменение объема насыщенной водой породы в процессе ее охлаждения, можно видеть резкое увеличение объема породы в момент фазового перехода воды, т. е. ее замерзания в порах породы с постепенным уменьшением общего объема при дальнейшем охлаждении. Форма и высота пика, отвечающего тому максимуму объема, который приурочен ко времени замерзания основной массы воды, зависят от скорости перехода образца через точку замерзания. Дальнейшее охлаждение породы после перехода всей воды в лед вплоть до температур жидкого воздуха дает лишь уменьшение объема — «усадку» образца породы.

Уменьшение объема образца во времени происходит также и без последующего охлаждения. После каждого понижения температуры ниже точки замерзания объем образца сначала резко увеличивается в соответствии с переходом части воды в лед, а затем постепенно уменьшается вследствие перегруппировок воды и льда. Характерно, что скорость усадки при -1° больше, чем при -5° , а абсолютная величина усадки увеличивается с понижением температуры. В песчаниках величина усадки достигает 0,02%.

Влияние скорости замораживания на деформацию и потерю прочности породы можно убедительно иллюстрировать следующими данными.

При постепенном охлаждении известняка до -5° в течение 23,5 часа максимальная линейная деформация его была $0,38 \cdot 10^{-4}$ мм, а после погружения образца в ванну с жидкостью при -5° линейная деформация его была в 11 раз больше, т. е. $4,05 \cdot 10^{-4}$ мм.

Модуль упругости известняка после трех медленных замораживаний понижался на 5—10% в зависимости от размера образца; после одного быстрого замораживания понижение модуля упругости составило 60—82%. Образец, подвергнутый охлаждению в воздухе до -5° и затем охлажденный сухим льдом, показал снижение модуля упругости всего на 8—10%, тогда как модуль упругости образца, непосредственно охлажденного сухим льдом, снижался на 16—40%.

Таким образом, разрушающее напряжение, возникающее в камне при замораживании, зависит от соотношения между скоростью образования льда в нем и легкостью «рассасывания» возникающих местных давлений. При этом нижним пределом давлений может быть давление свободно растущего кристалла льда (около $0,5$ кг/см²), а верхним пределом — давление воды, замерзающей в замкнутой системе (до 2000 кг/см² при температуре -22°).

Практически наблюдаемые средние давления в известняках, песчаниках и аналогичных по пористости рыхлых породах составляют, по данным разных авторов, $0,6—23 \text{ кг/см}^2$, что недостаточно для разрушения большинства пород. Это, вероятно, говорит о наличии в отдельных порах камня местных давлений, значительно превышающих средние давления, определяемые по средней деформации камня в процессе замораживания. Ясно, что при полном насыщении камня и одинаковой скорости его охлаждения процессы уравнивания внутренних давлений пойдут по-разному, в зависимости от размеров образца, степени равномерности охлаждения с разных сторон и состояния поверхности камня.

Для иллюстрации последнего положения приводим результаты опыта, при котором модуль упругости камня в его естественном виде после двукратного замораживания со скоростью 3° в час понизился на 39%; после покраски его масляной краской — на 60% и после пропитывания половины образца воском — на 63%. При этом часть воды вытеснялась из образца с незащищенной стороны, но вблизи поверхности раздела с пропитанной частью наблюдались значительные разрушения.

К таким же результатам приводит всякое уплотнение наружной поверхности камня (что имеет место при фактической работе камня в сооружении), мешающее свободному испарению и вытеснению льда с поверхности и способствующее накоплению влажности в результате конденсации. Исключением может явиться только гидроизоляционное покрытие, которое резко уменьшает наружную влажность камня при отсутствии постепенного накопления влажности под ним за счет капиллярной и конденсационной воды, на что должно быть обращено специальное внимание.

Изложенные выше данные показывают, с каким сложным комплексом явлений приходится иметь дело при изучении морозостойкости даже какой-либо одной породы в различных условиях замораживания. Вопрос еще более усложняется при сравнении морозостойкости пород разных структурных типов.

Возможно, что наиболее объективным методом определения морозостойкости явилось бы именно изучение дифференциальной пористости камня, т. е. изучение структуры порового пространства породы, где протекают процессы кристаллизации воды. Однако такой метод представляет ряд методических трудностей и пока еще не может быть широко использован в практике.

Поры в зависимости от характера кристаллизации в них воды можно разделить на 5 групп:

1) очень узкие поры, в которых преобладают адсорбционные силы и вода не участвует в обычных процессах замерзания ($D \approx n \cdot 10^{-7} \text{—} n \cdot 10^{-4} \text{ мм}$);

2) поры капиллярных размеров, способные заполняться в условиях испытаний или службы камня и в которых вода замерзает ($D \approx n \cdot 10^{-4} \div n \cdot 10^{-1}$ мм);

3) весьма крупные поры, которые не заполняются водой в условиях службы камня и оказывают благоприятное влияние на морозостойкость, например, поры известняка-ракушечника ($D > n$ мм);

4) поры, полностью недоступные для проникновения в них воды, как, например, замкнутые поры некоторых туфов;

5) капиллярные поры промежуточного типа, которые можно назвать полузамкнутыми и которые резко меняют свои свойства в различных условиях насыщения водой и службы камня. До тех пор, пока в такие поры не проникла вода, они могут оказывать благоприятное влияние на морозостойкость камня как компенсаторы давлений; но если они все же окажутся заполненными водой в результате многократной миграции воды в камне, то вода замерзает в них в условиях, близких к условиям замкнутой системы, и может создать очень высокие внутренние давления.

Вероятно, именно последнее явление объясняет разрушающее действие так называемой «горной» или «карьерной» влажности, которое характерно для многих строительных камней. Судя по известным нам анализам, эта влага не имеет особого специфического химического состава, а отвечает составу подземных или грунтовых вод; ее характерной особенностью является связь с полузамкнутыми порами, заполняющимися с большим трудом. Однако нет никаких данных, позволяющих утверждать, что заполнение таких пор невозможно в условиях обычной службы камня, в течение длительных промежутков времени.

Поры капилляров, размеры которых обычно изменяются от десятитысячных долей до целых миллиметров, настолько же различно влияют на морозостойкость породы. По нашим данным (1950 г.), прочность при замораживании (рис. 4), т. е. морозостойкость известняков с большим количеством узких пор, невидимых в микроскоп, падает.

Эти поры назовем ультрамикropорами или ультрапорами, диаметр их, по видимому, равен $n \cdot 10^{-4} \div n \cdot 10^{-3}$ мм. Некоторые исследователи (без серьезных оснований) принимают верхнюю границу размера ультрапор 0,005 мм.

Истинная физическая сущность явления еще не вполне ясна для нас, и мы воздерживаемся от преждевременных суждений, хотя особая роль ультрапор в процессах замораживания подтверждается другими исследователями. Так, в то время как общая пористость известняка после 60 циклов замораживания и оттаивания увеличилась с 27 до 44%, т. е. в 1,55 раза, его ультрапористость уменьшилась в 1,55 раза (случайное совпадение данных). Таким образом, повышение пористости произошло полностью вследствие увеличения количества обычных пор.

Исследования известняков давно построенных зданий показали, что пористость этих камней в процессе службы возрастает за счет увеличения количества пор, наблюдаемых в микроскоп.

Возможно, что для морозостойкости камня решающее значение имеют не ультрапоры сами по себе, а большая гетеропорозность всей системы пор, которая проявляется как одновременное присутствие капиллярных пор, резко различных по своим размерам. Представляется вероятным, что наиболее морозостойкие структуры должны характеризоваться изомерными порами равных размеров, свободно соединяющимися друг с другом по типу

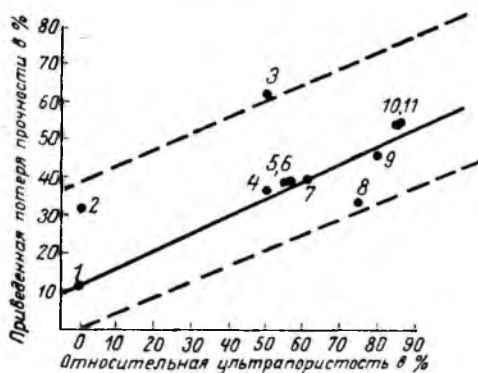


Рис. 4. Зависимость приведенной потери прочности при замораживании от относительной ультрапористости. Сплошной линией показана тенденция изменения приведенной прочности, а пунктирными линиями — пределы колебаний

сетки пересекающихся капилляров. С этой точки зрения интересно рассмотреть динамику процесса поглощения и отдачи воды разными образцами. Наименее морозостой-

кими структурами, повидимому, окажутся не те, которые легко впитывают, но и легко отдают влагу, а структуры с резко пониженной скоростью водоотдачи по сравнению со скоростью насыщения. Некоторые опытные данные подтверждают наш вывод.

По Гиршвальду (1912), теоретическая морозостойкость камня зависит от коэффициента насыщения породы и коэффициента размокания ее. Мы считаем, что определенные по методике Гиршвальда коэффициенты имеют чисто эмпирический смысл, так как они не вскрывают истинной физической сущности процесса и условия их определения носят произвольный характер. И насыщение, и размокание пород протекает очень своеобразно и не заканчивается в течение весьма длительных промежутков времени. Тем не менее, для ряда известняков установлено, что коэффициент насыщения является прямолинейной функцией ультрапористости.

Неморозостойкие глинистые и пелитоморфные (тонкозернистые) известняки, имеющие высокий коэффициент размокания, также должны иметь повышенное количество ультрапор, так что и не следует, может быть, отказываться от этого пути оценки морозостойкости пород, а надо придать ему более обоснованный характер.

Выводы

Если рассматривать даже в общих чертах поведение воды в процессе замерзания камня, то становится ясным, что для получения вполне сравнимых результатов испытаний на морозостойкость необходимо очень строго выдерживать постоянство условий испытания. Решающими факторами при этом являются степень насыщения породы водой и скорость процесса замораживания. Фактическую степень насыщения породы нельзя полностью контролировать весовым методом вследствие особенностей распределения воды внутри образца, что в данной породе зависит и от условий насыщения ее и от условий протекания процессов замораживания и оттаивания.

Существующая методика насыщения водой дает степень насыщения породы, близкую к насыщению при капиллярном подсосе, однако в процессе проведения испытаний влажность может меняться, и в отдельных участках камня относительное увеличение ее может дойти до 100%. В результате, даже при постоянных условиях температуры замораживания, мы имеем фактически неопределенную степень насыщения водой и различную скорость промораживания вследствие значительно меняющейся (в зависимости от влажности) теплопроводности породы.

В реальных условиях службы камня максимальная степень насыщения отдельных его участков нам неизвестна, но есть все основания предполагать, что и в этих условиях фактические разрушения камня связаны с образованием насыщенной водой зоны, лежащей на некоторой глубине под поверхностью.

Создающуюся неопределенность условий испытаний пытаются компенсировать проведением большого количества циклов замораживания и оттаивания, затрачивая очень много времени.

Испытания, проведенные в различных лабораториях, дают плохо согласующиеся результаты вследствие небольших различий в условиях опытов, которые не оговариваются достаточно ясно. Число циклов испытания принимается без каких-либо серьезных оснований и подбирается таким образом, чтобы можно было оценить разрушение породы наиболее простыми методами наблюдения. Скорость охлаждения не обуславливается и в ряде случаев не соблюдается, так как конечная температура образцов устанавливается в зависимости от объема холодильного шкафа, его мощности и ряда других причин.

Вынося на широкое обсуждение разработку рациональных методов испытания морозостойкости, мы приводим следующие положения, вытекающие из проведенного нами исследования.

1. Ввиду неопределенности условий будущей службы камня неясно, какие структурные типы пор и в какой степени будут насыщаться водой. Во всяком случае, распределение воды в

породе, полученное методом капиллярного насыщения, резко изменится в процессе многократных циклов замораживания и оттаивания, и степень насыщения отдельных зон камня может увеличиться или уменьшиться даже вдвое, т. е. на 100%. Поэтому при испытаниях целесообразно полностью насыщать камень, что создаст определенность условий испытания и приблизит их к вероятным условиям насыщения водой отдельных зон.

Как показали наши работы, насыщение камня водой под вакуумом удается достаточно быстро довести до 97—100% капиллярной пористости. Относительная ошибка в степени насыщения при этом составляет 2—3%. При таком насыщении его можно поддерживать равномерным до конца испытания, и оно охватывает все группы пор, способные заполняться водой и удерживать ее капиллярными силами.

Так как большинство и практически стойких камней при многократном замораживании и оттаивании в условиях полного насыщения будет разрушаться, то о степени морозостойкости следует судить не по визуальному определению степени и характера разрушений, а по изменению структуры камня. Это изменение устанавливается сравнительным изучением микроструктуры камня до и после замораживания.

2. В качестве метода оценки происходящих при замораживании нарушений структуры образца следует принять определение падения упругих свойств камня. Это позволит компенсировать влияние возможной неоднородности породы на результаты испытания и, начиная с первого цикла замораживания, следить за стойкостью камня, не доводя его до разрушения. При этом мы исходим из того, что если замораживание разрушает камень, то, применяя достаточно точные методы наблюдения, разрушение можно установить в самых начальных его стадиях. Падение прочности в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания должно соответствовать ряду типовых кривых и определяться начальным наклоном их.

Некоторые авторы указывают, что кривые, выражающие зависимость падения прочности образца от числа циклов замораживания и оттаивания, имеют изломы то в одну, то в другую сторону. Это подтверждает наши представления о фактической неравномерности условий замораживания.

Применение типовых кривых падения прочности позволит резко снизить число циклов испытания, необходимое для оценки морозостойкости породы.

Нам представляется вероятным, что наиболее целесообразным испытанием падения прочности явится определение изменения модуля упругости при изгибе.

3. Температура замораживания при испытании на морозостойкость должна обеспечить полное замораживание воды в камне при охлаждении с заданной скоростью. Температуру замораживания следует принимать несколько ниже равновесной

температуры замерзания в узких капиллярах, чтобы не оставалось незамерзшей воды. Для того чтобы испытания на морозостойкость всех строительных материалов можно было проводить по единой методике, рекомендуется минимальную температуру замораживания принять несколько ниже той, при которой вода замерзает в грубопористых телах. Практически, при продолжительности замораживания 3—5 час. температура его не должна превышать предела от -15 до -20° *, хотя фактически при достаточной продолжительности замораживания вода в большинстве пород замерзает в интервале от -6 до -12° . Дальнейшее охлаждение, как правило, не дает никаких результатов.

4. Следует особое внимание обратить на скорость охлаждения образцов и равномерность его. Если считать, что скорость охлаждения является постоянной и зависит от температуры воздуха в холодильном шкафу, тогда необходимо выработать соотношение между мощностью шкафа и допускаемой его нагрузкой, обеспечивающее равную фактическую скорость охлаждения образцов во всех испытательных лабораториях.

5. Следует продумать взаимное расположение образцов, обеспечивающее равномерность их охлаждения со всех сторон. Мы считаем, что при точном выполнении условий испытания можно установить переходные коэффициенты для сопоставления лабораторных условий охлаждения, идущего обычно со скоростью 3—7° в час, с природными условиями замораживания при различном климате, когда охлаждение идет со скоростью 0,5—3° в час. Для различных основных типов структуры камня эти коэффициенты будут, вероятно, различны. Однако целесообразно сразу же приблизить лабораторные условия замораживания к природным, особенно на время замерзания основной части воды.

6. Морозостойкость породы, установленную при указанных строго определенных условиях, можно назвать структурной морозостойкостью породы, связав ее с микроскопической и с физической структурой камня.

7. Фактическая морозостойкость камня в сооружении зависит от его структурной стойкости и максимальной зональной степени насыщения, возможной в конкретных условиях службы камня. Для выяснения последнего вопроса необходимо немедленно провести широкие натурные обследования влажности различных сооружений в возможно более тонких слоях по толщине стен, на разной высоте от земли.

8. Можно предложить морозостойкость каждого материала определять в условиях, приближающихся к определению его физических констант, и по единой для всех строительных ма-

* Температура, при которой замерзающая в замкнутой системе вода оказывает максимальное давление, равна -22° .

териалов системе, а затем уже вводить поправочные коэффициенты для учета службы материала при разных климатических условиях в разных местах сооружения. Существующие предложения об испытании каждого материала по-разному, в зависимости от условий службы, следует признать нерациональными, так как при этом резко увеличится число испытаний одного и того же материала и нельзя будет накапливать достаточно широкие сравнительные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Быков, П. Н. Каптерев, Вечная мерзлота и строительство на ней, Трансжелдориздат, М., 1940.
2. Б. П. Вайнберг, Лед, Государственное издательство технико-теоретической литературы, М.—Л., 1940.
3. Б. В. Залесский, А. И. Корсунский и В. В. Лапин, О долговечности некоторых разностей карбонатных пород Самарской Луки, Труды института геологических наук АН СССР, вып. 58, петрограф. серия (№ 19), 1941.
4. Б. В. Залесский, В. Я. Степанов, К. П. Флоренский, Опыт изучения физических свойств известняков мячковского горизонта (мячковская группа месторождений), Труды института геологических наук АН СССР, вып. 121, петрограф. серия (№ 36), 1950.
5. Б. В. Залесский, В. Я. Степанов, К. П. Флоренский, Сообщение 2, Песковская группа месторождений, Труды института геологических наук АН СССР, вып. 122, петрограф. серия (№ 37), 1950.
6. В. Я. Степанов и К. П. Флоренский, Наблюдения над характером разрушения белокаменных памятников архитектуры Владимиро-Суздальской Руси XII—XIII веков. Труды Института геологических наук, вып. 146, петрограф. серия (№ 42), 1952.
7. А. Финдлей, Правило фаз и его применение, ГНТИ, 1932.
8. И. А. Цитович, О незамерзающей воде в рыхлых горных породах, Известия АН СССР, Серия геологическая, № 3, 1947.
9. Н. А. Цитович, К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах, Известия АН СССР, серия географическая, т. 9, № 5—6, 1945.
10. А. В. Шубников, Как растут кристаллы, из-во АН СССР, 1935.
11. Thomas W. N., Experiments on the crushing of certain building materials. Building Research Techn. Pap. № 17, 1938.
12. D. J. Hirschwald, Handbuch der bautechnische Gesteinsprüfung, Berlin, 1912.