

Т Р У Д Ы
ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

ВЫП. 146. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ СЕРИЯ (№ 42). 1952

Б. П. Беликов. Модули упругости различных типов горных пород СССР. Б. В. Залесский и К. П. Флоренский. О некоторых основных предпосылках испытаний каменных строительных материалов на морозоустойчивость. В. В. Лавин и Г. С. Бурлаков. Использование топливных шлаков для получения строительных материалов (особенности структуры и состава). Ю. А. Розанов. Влияние макро-структурных особенностей горных пород на анизотропность их механических свойств. В. Я. Степанов и К. П. Флоренский. Наблюдения над характером разрушения белокаменных памятников архитектуры Владимиро-Суздальской Руси XII—XIII вв. Ю. А. Розанов. Зависимость физико-механических свойств известняков от особенностей их структуры.



ТРУДЫ

ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

ВЫП. 146. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ СЕРИЯ (№ 42). 1952

Б. И. Беликов. Модули упругости различных типов горных пород СССР. Б. В. Залесский и К. П. Флоренский. О некоторых основных предпосылках испытаний каменных строительных материалов на морозоустойчивость. В. В. Лапин и Г. С. Бурлаков. Особенности структуры и состава топливных шлаков с точки зрения использования их для получения строительных материалов (особенности структуры и состава). Ю. А. Розанов. Влияние макроструктурных особенностей горных пород на анизотропность их механических свойств. В. Я. Степанов и К. П. Флоренский. Наблюдения над характером разрушения белокаменных памятников архитектуры Владимиро-Суздальской Руси XII—XIII вв. Ю. А. Розанов. Зависимость физико-механических свойств известняков от особенностей их структуры



Главный редактор
академик Д. С. БЕЛЯНИН

Ответственный редактор
В. В. ЛАПИН

Б. П. БЕЛИКОВ

МОДУЛИ УПРУГОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГОРНЫХ
ПОРОД СССР

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Определение упругих констант горных пород имеет значение для многих отраслей: в геологии — для решения вопросов, связанных с механизмом тектонических процессов, в геофизике — для расшифровки некоторых проблем прикладной геофизики и сейсмологии, в горном деле — для правильного решения вопросов управления кровлей и, наконец, в строительстве — для решения вопросов о возможности применения камня и его службы.

Столь широкая потребность в знании упругих констант горных пород вызывает необходимость как в большом числе надежных определений, так и в систематизации полученных данных, причем в основу систематизации должен быть положен петрографический принцип: общность состава, структуры, генезиса и истории развития породы. Несмотря на это упругие константы до настоящего времени почти не определялись.

Из известных нам немногочисленных отечественных работ могут быть названы следующие: фактические материалы Н. П. Гришковой (1937) по породам Донбасса, обобщенные в статьях Ф. А. Белаенко (1936, 1937), работа Г. П. Ефимова (1937) по определению модуля упругости методом изгиба, данные Л. Я. Нестерова (1940), материалы Г. Н. Кузнецова (1947), относящиеся, однако, преимущественно к каменной соли, работы П. М. Цимбаревича (1948) по пяти осадочным и метаморфическим породам и работы по облицовочному камню (1948).

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАБОТЫ

В Лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород Института геологических наук исследования по определению модуля упругости горных пород были начаты еще в 1938—1940 гг.; первые публикации появились, однако, значительно позже (Белянкин, Залесский и Беликов, 1948; Залесский и Беликов, 1948). Был принят метод определения модуля упругости при одноосном, статическом сжатии, разработанный для металлов и базирующийся на законе Гука о пропорциональности деформаций приложенным нагрузкам:

$$\Delta l = P \frac{l}{FE}, \quad (1)$$

где l — длина испытуемой части образца; Δl — абсолютная деформация ее; P — приложенная сила; F — площадь; E — коэффициент пропорциональности, различный для разных материалов.

Отсюда

$$E = \frac{Pl}{F\Delta l} \text{ кг / см}^2. \quad (2)$$

E — коэффициент пропорциональности — носит название модуля упругости при растяжении или сжатии (модуль Юнга) и характеризует сопротивляемость материала упругим деформациям. Чем больше E , тем меньше (при прочих равных условиях) деформируется тело при данной нагрузке.

Модуль Юнга определяется в пределах упругости, что само по себе является допущением, ибо известно, что абсолютно упругих деформаций почти никогда не наблюдается: к ним всегда примешиваются пластические деформации и деформации упругого последействия (для металлов — очень незначительно, для некоторых горных пород — весьма чувствительно). Второе допущение — зависимость значений E для пористых тел от пределов приложенных нагрузок. Эта зависимость хорошо иллюстрируется диаграммами деформаций, представляющими собой, как правило, не прямые, а вогнутые кривые, что соответствует увеличению значений E с повышением нагрузок. На зависимость последнего явления от пористости и трещиноватости указывалось еще Зисменом (Zisman, 1933₂), однако он не провел экспериментальной проверки этого положения.

В данной работе нами сделана попытка выяснить качественную и количественную зависимость упругих свойств от структуры, причем за главный структурный признак принята эффективная пористость. Модуль Юнга в данном случае, таким образом, величина условная, зависящая от характера и размера приложенных нагрузок. Так как степень этой зависимости не одинакова для разных пород, то все публикуемые ниже данные сопровождаются описаниями условий эксперимента.

Большое влияние на величины упругих констант оказывает ориентировка давлений относительно слоистости породы, что было прекрасно показано в работах Н. П. Гришковой и Ф. А. Белаенко по осадочным породам Донбасса. В изверженных породах, например в граните, даже незаметная невооруженным глазом ориентировка, определяемая лишь точным микроскопированием (структурно-статистический метод), уже сказывается на величинах констант, как это было показано нами (Беликов, 1948).

Таким образом, экспериментирование должно идти по трем направлениям:

- 1) анализ самих явлений деформации с целью разделения их на упругие, пластические и упругого последействия;
- 2) выяснение влияний влажности, а также мороза и влаги одновременно на упругие свойства;
- 3) установление зависимостей E от других физических и механических свойств породы (прочность, твердость, пористость).

В настоящей статье приводятся материалы по некоторым экспериментам второго и третьего направлений.

Заслуживают внимания также вопросы методики — сравнение модулей упругости E , полученных разными методами: 1) сейсмическим, динамическим и статическим; 2) путем сжатия, растягивания и изгиба. Однако это, скорее, область механики или геофизики.

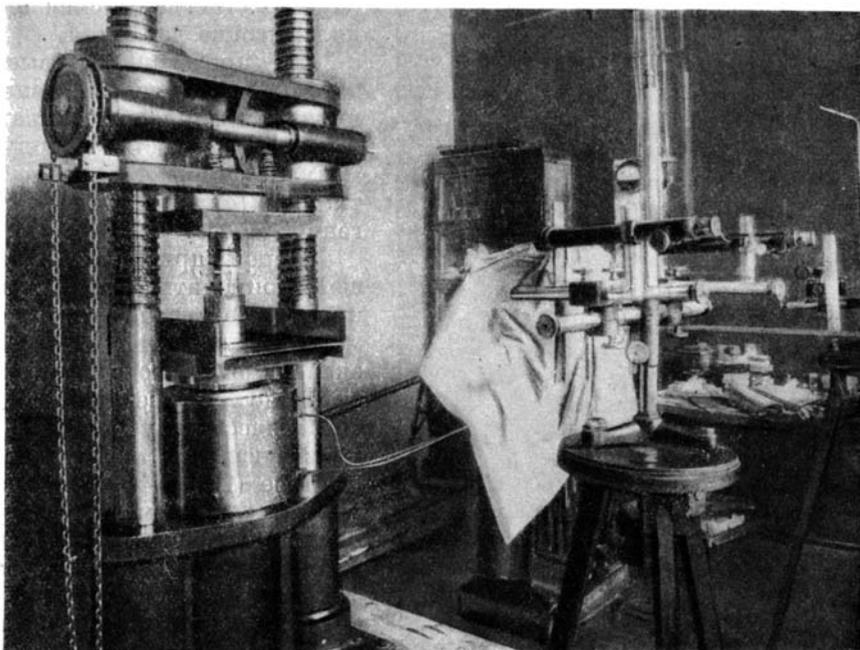
Очень существенное преимущество экспериментов по определению упругих констант — это возможность многократного определения этих констант на одном и том же образце, так как последний в процессе таких

испытаний не разрушается и вряд ли претерпевает значительные внутренние изменения. Вследствие этого можно делать проверку и производить повторные эксперименты на одной и той же призме, что при неоднородности горных пород очень удобно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из приведенных выше соображений и возможностей лаборатории, нами была принята следующая методика определения модуля упругости.

Образцы, вырезанные из пробного блока породы как можно ближе друг к другу и с одинаковой ориентировкой, имели прямоугольную форму (размер их — $5 \times 5 \times 12$ см), с тщательно, под лекальную линейку,

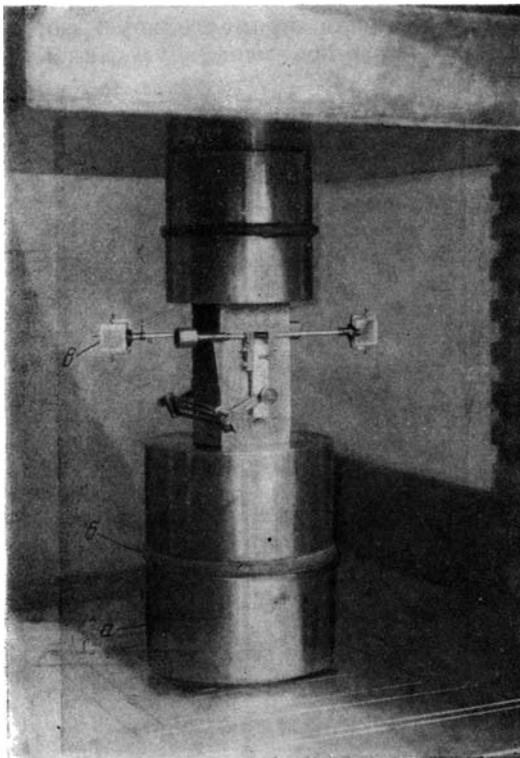


Фиг. 1. Общий вид установки для определения модуля упругости

пришлифованными гранями, строго параллельными друг другу. Образцы высушивали при 120° и выдерживали в лаборатории для придания им постоянной влажности. Для измерения деформаций применяли зеркальный тензомер Мартенса (фиг. 1), дающий точность в $0,0002$ — $0,0005$ см и обеспечивающий достаточную надежность результатов. Образцы подвергали сжатию на гидравлическом прессе Амслера, снабженном специальным удержателем давления.

Давление давали ступенчатыми нагрузками с интервалами 50 или 100 кг/см^2 и доводили обычно до 50% прочности породы. Испытание состояло из двух или трех последовательных полных нагрузок и разгрузок, причем вычисления производились для каждой ступени отдельно с целью контроля над ходом приборов. Модуль упругости определяли как среднее из двух циклов (двух нагрузок и двух разгрузок), а в случае колеблющихся результатов — трех циклов. Так как определение модуля упругости относится к числу наименее освоенных методов испытания камня и

нередко наблюдались нарушения в нормальной работе приборов, то расчет частных деформаций (по ступеням) производили немедленно после испытания или, во всяком случае, до снятия с образца тензосметров. В целях устранения влияния возможных перекосов и эксцентренных смещений употребляли шарнирные прокладки, как это показано на фиг. 2. Давления применялись высокие, обычно от 100 до 1000 кг/см²; при этом полученные значения E не совпадают со многими цифрами, данными в свое время Зисменом (Zisman, 1933). У нас они всегда значительно выше, что объясняется слишком малыми давлениями, примененными Зисменом. Совпадение значений E , полученных Зисменом, как с нашими, так и с определенными сейсмически (по скорости распространения упругих волн) наблюдается лишь в тех случаях, когда Зисмен применял высокие давления.



Фиг. 2. Установка призмы на прессе
 а — шарнирная прокладка; б — шаровой шарнир прокладки; в — зеркальный прибор

Мы прибегали к высоким давлениям с целью понизить влияние микротрещиноватости и микропористости и получить модули, наиболее близкие к истинным, определенным в однородной среде.

Второй причиной, побудившей применить высокие давления, было стремление по возможности создать такие условия эксперимента, которые приблизительно соответствовали бы геологическим условиям, господствующим на некоторой глубине (1000—4000 м), где породы в основном еще упруги, но не пластичны, как это должно быть на больших глубинах с высокой температурой. Полученные таким образом константы могут дать представление о реакциях пород на усилия, развивающиеся при складкообразовательных процессах, которые происходят на небольших глубинах в условиях упругого состояния.

При геологической интерпретации физических и механических констант всегда возникает один и тот же вопрос: о возможности распространения лабораторных данных на массивы горных пород.

Константы упругости связаны, как известно, со скоростью распространения упругих волн следующим уравнением:

Константы упругости связаны, как известно, со скоростью распространения упругих волн следующим уравнением:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (3)$$

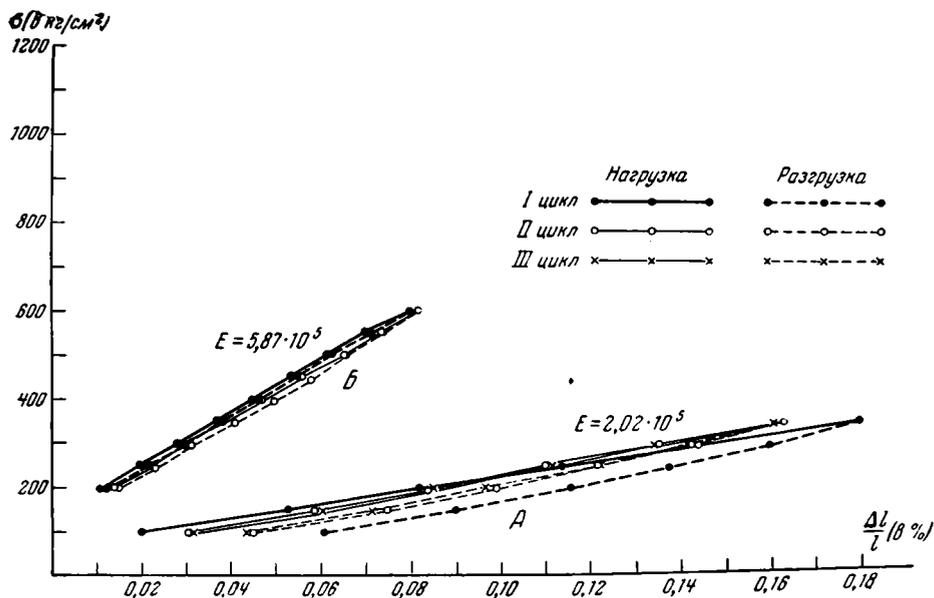
где V — скорость распространения продольных волн; μ — коэффициент Пуассона (отношение поперечного расширения к продольному сжатию); ρ — плотность породы.

О возможности использования лабораторных данных для изучения массивов горных пород можно судить, сравнивая значения E для одной и той же породы, полученные сейсмически (т. е. в самом массиве) и статическим методом (в лаборатории). Подобные сравнения были сделаны Зисменом (Zisman, 1933) для гранитов США и Ричардсом для известняков юго-западного Ирана; результаты в обоих случаях¹ оказались весьма близкими и не выходящими за пределы ошибки опыта. Можно считать, таким образом, что константы упругости, получаемые статическим методом, определяют свойства пород в массивах и могут быть приложены для интерпретации геологических явлений и геофизических расчетов.

Объем исследования, излагаемого в этой статье, станет понятным, если учесть, что для получения каждой результативной цифры необходимо было произвести от 32 до 100 измерений и соответствующее число расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для наглядного изображения хода испытаний были построены кривые деформации. По ординатам откладывались нагрузки σ в $\text{кг}/\text{см}^2$, по абсциссам — относительные деформации $\frac{\Delta l}{l}$ в %. Здесь нами приводятся наиболее типичные кривые для 4 пород (фиг. 3, А—Г).

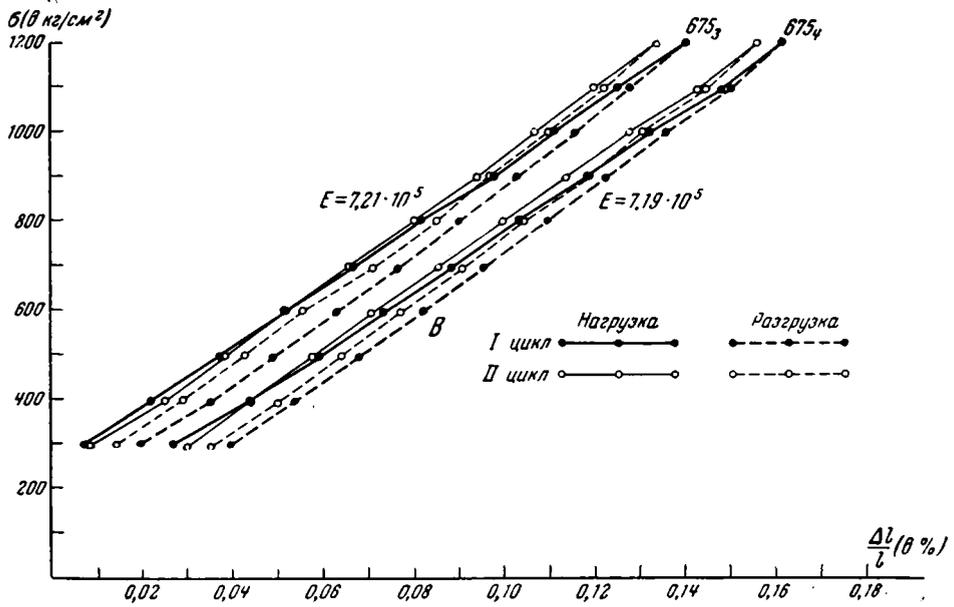


Фиг. 3, А — Б. Кривые деформации известняков

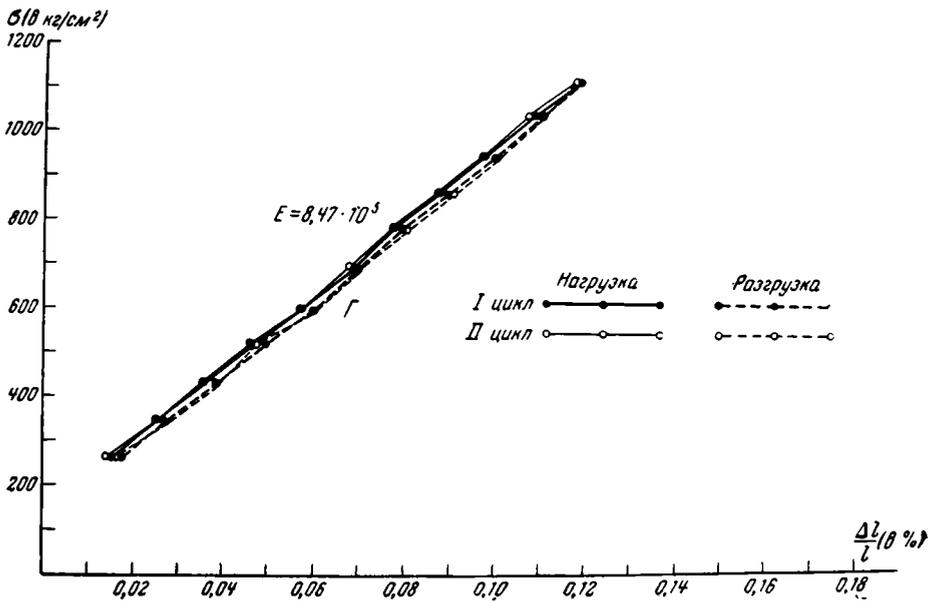
А — известняк подмосковный, обр. № 660, (параллельно слоистости); Б — известняк воленгофенский, обр. № 691, (параллельно слоистости)

Первая диаграмма (фиг. 3, А) относится к образцу № 660₁, сильно пористому подмосковному известняку, вырезанному параллельно слоистости породы. На диаграмме показаны 6 кривых, отвечающих трем циклам

¹ У Зисмена — лишь в тех случаях, когда он брал E , определенные при высоких давлениях.



Фиг. 3, В. Кривые деформации гранитов
 Обр. № 675₃ — гранит украинский (параллельно слоистости); обр. № 675₄ — тот же гранит (перпендикулярно слоистости)



Фиг. 3, Г. Кривые деформации кварцита
 Обр. № 642 — кварцит карельский (параллельно слоистости)

нагрузок и разгрузок образца. Образец был испытан без предварительной обжимки, поэтому кривые первого цикла довольно резко отличаются от кривых двух последующих циклов (в них кривые нагрузки и разгрузки почти точно накладываются друг на друга). Кривые полого наклонены к абсциссам, что указывает на малые значения E , соответственно равные:

для первого цикла:	при нагрузке	— $1,57 \cdot 10^5$	кг/см ²
	разгрузке	— $2,09 \cdot 10^5$	»
для второго цикла:	при нагрузке	— $1,90 \cdot 10^5$	»
	разгрузке	— $2,12 \cdot 10^5$	»
для третьего цикла:	при нагрузке	— $1,93 \cdot 10^5$	»
	разгрузке	— $2,13 \cdot 10^5$	»

Пониженное значение модуля и широкая петля гистерезиса при первой нагрузке отвечают, вероятно, явлению необратимой деформации закрытия пор. В дальнейшем это явление почти исчезает, и кривые накладываются друг на друга, причем петли гистерезиса получаются менее значительными.

Вторая диаграмма (фиг. 3,Б) относится к плотному, очень однородному золенгофенскому известняку (обр. № 691з), третья (фиг. 3,В) — к красному среднезернистому граниту с Украины (обр. № 675).

Здесь нанесены испытания двух призм, вырезанных параллельно (обр. № 675_з) и перпендикулярно (обр. № 675_д) к плоскопараллельной ориентировке его. Образцы испытывались без предварительной обжимки, и на диаграммах видна та же картина смещения петель гистерезиса. Для этой породы определен также коэффициент Пуассона μ , получившийся равным 0,28. Определение μ произведено тензотрами Хугенбергера при тех же давлениях, при которых определялось и E .

Диаграмма четвертая (фиг. 3,Г) построена для плотного белого карельского кварцита (обр. № 642), пористость которого весьма близка к нулю. Здесь петли гистерезиса почти отсутствуют, и кривая приближается к прямой. Для всех кривых характерна очень слабо вогнутая форма, отвечающая возрастанию E с повышением нагрузки. Наклон кривых также типичен: так как величина модуля отвечает тангенсу угла между касательной к кривой и осью абсцисс, то с понижением модуля кривые выполаживаются.

Таковы типы деформаций для разных по своей структуре пород. В данной статье мы воздерживаемся от выделения упругих и остаточных деформаций на этих кривых.

В приводимых ниже таблицах испытаний (1—5) мы ограничиваемся только средними значениями E (представляющими каждое результат многих измерений) отдельно при нагрузке и разгрузке, так как величины эти обычно не совпадают.

Затем дается величина принудительного влагонасыщения — количество влаги, принимаемой образцом при 150 атм. давления, выраженное в вес.%. Данная константа является хорошим показателем пористости породы, так как, будучи помноженной на объемный вес, она дает кажущуюся или эффективную пористость, т. е. величину, приближающуюся к истинной пористости (соотношению удельного и объемного весов). Значения кажущейся пористости указаны в следующей графе.

В последней графе табл. 1—5 приводится временное сопротивление сжатию. Мы дополнили таблицы этой основной константой прочности, так как ею принято пользоваться в практических расчетах и на величинах ее обосновано, кроме того, большое число физико-механических классификаций и теорий прочности горных пород.

Многие породы, особенно кварциты, были испытаны по двум направлениям давления, ориентированным параллельно и перпендикулярно слоистости. В подавляющем большинстве случаев более высокие значения E отвечают ориентировке давления, параллельной слоистости.

Большое достоинство этих испытаний — свежесть главной части испытанных пород: образцы мы брали из карьеров на достаточной глубине, и они свободны от следов поверхностного выветривания, обычно сильно меняющего механические свойства камня.

Для удобства сравнения весь материал разбит на классы: 1) граниты и другие изверженные породы, 2) кварциты и песчаники, 3) мраморы и мраморизованные известняки, 4) доломиты и известняки.

1. Граниты и другие изверженные породы (табл. 1)

По значениям E среди гранитов естественно выделяются две значительные группы: платформенные (украинские, карельские и ленинградские), с одной стороны, и геосинклинальные (кавказские) — с другой. Подробное описание этих пород было дано ранее в работах Б. В. Залесского и Б. П. Беликова, Б. В. Залесского и А. А. Турцева. Поэтому здесь мы приводим лишь краткое их описание.



Фиг. 4. Гранит (Кавказ), обр. № 517.
С анализатором, $\times 20$



Фиг. 5. Гранит (Украина), обр. № 441.
С анализатором, $\times 20$

Украинские граниты подразделяются на 5 типов:

1) Серые биотитовые граниты с порфиroidными вкрапленниками бесцветного микроклина.

2) Серые и, реже, розовые среднезернистые биотитовые граниты.

3) Крупнозернистые красные и серо-красные биотитовые, реже роговообманковые граниты.

4) Красные и серые среднезернистые граниты, иногда с амезистом.

5) Гранито-гнейсы.

Коростышевский тип (обр. № 625, 674, 678, 719, 727, 742, 753).

Житомирский тип (обр. № 314, 318, 441, 629, 675, 721, 724, 754, 757, 833, 835).

Тип рапакви (обр. № 626, 641, 717, 729, 731, 743, 755, 756, 829, 830, 831, 832, 840).

Осницкий тип (обр. № 696, 853, 854, 855).

Обр. № 728, 768, 784.

Как видно из этого перечня, испытанные украинские граниты характеризуются большим разнообразием типов.

Среди карельских и ленинградских гранитов также различается несколько типов:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1) Биотитовые серые и розовые среднезернистые граниты (сходны с житомирскими). | Онежский тип (обр. № 221, 222, 673). |
| 2) Красные среднезернистые и крупнозернистые биотитовые граниты. | Обр. № 764, 791, 792, 793, 794, 795. |
| 3) Красные крупнозернистые граниты. | Тип рапакиви (обр. № 504). |
| 4) Гранито-гнейсы. | Обр. № 787 и 884. |

Кавказские граниты естественно делятся на древние и молодые:

- | | |
|---|--|
| 1) Древние мелкозернистые светлосерые биотитово-мусковитовые граниты (сходны с житомирскими). | Центральная древняя интрузия Главного хребта (обр. № 363, 444, 445, 446, 517, 519, 520). |
| 2) Молодые светлосерые биотитовые и роговообманковые граниты. | Неоинтрузии (обр. № 372 и 639). |

Сравнивая между собой древние граниты: украинские и карельские, с одной стороны, и кавказские — с другой, видим довольно отчетливую разницу в значениях E . В то время как для первых величина E всегда выше $6,5 \cdot 10^5$ и только для одного из гранитов (обр. № 318, 833, 835) опускается до $5,4 \cdot 10^5$, у вторых она не поднимается выше $5,0 \cdot 10^5$, снижаясь до $4,2 \cdot 10^5$ кг/см². Анализ других физических констант, например пористости, обычно сильно влияющей на значение E , показывает, что для обеих групп пористость практически одинаково мала, т. е. не характерна.

Разница в структуре пород улавливается только микроскопическим изучением пород обеих групп: при одинаковом минералогическом составе степеней катаклаза и измененности минералов различна. Особенно это заметно на кварце. В то время как в платформенных гранитах он не затронут изменением или доведен катаклизом лишь до волнистого погасания, в кавказских гранитах кварц совершенно раздроблен или имеет мозаичную структуру (фиг. 4 и 5). На величине пористости (водопоглощения) изменения эти, повидимому, не сказываются. Временное сопротивление сжатию, как это видно из таблицы, хотя и менее четко, но также отражает указанные выше структурные отношения. Разные механические свойства двух описанных типов гранита зависят, повидимому, от разницы в истории тектонического их развития.

Три испытанные нами основные породы — серый иризирующий лабрадорит, олонецкий диабаз и уральский анортозит — по значениям E стоят выше гранитов всех месторождений. На высокую упругость основных пород указывалось, впрочем, и ранее!

2. Кварциты и песчаники (табл. 2)

Таблица включает разные породы, граница между которыми не всегда ясна. Эти породы разделены нами на 4 группы:

- 1) Уральские кварциты и кварцито-песчаники (докембрий и силур)
- 2) Карельские кварциты и кварцито-песчаники (карелий).
- 3) Украинские и карельские красные кварцито-песчаники (иотний).
- 4) Белые песчаники Поволжья (третичные).

Как и следовало ожидать, для белых третичных песчаников Поволжья, характеризующихся высокой пористостью (до 6,4%), получены значения E более низкие, чем для всех остальных пород.

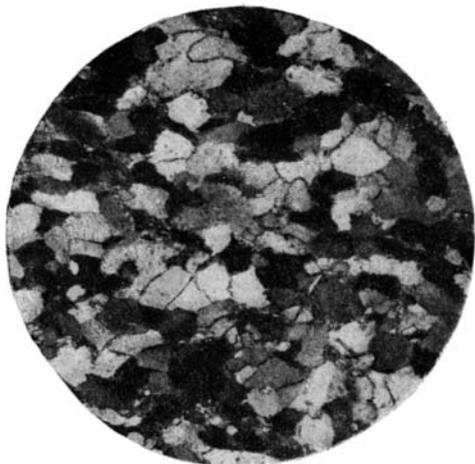
Среди прочих пород красные иотнийские кварцито-песчаники отличаются особо высокими модулями упругости; обращает на себя внимание сходство этих двух разновозрастных пород, происходящих из разных районов СССР — Карело-Финской ССР и Украинской ССР (фиг. 6 и 7). Высоким модулем упругости отличается и красный кварцито-песчаник с Урала, возраст которого определен, однако, как нижнесилурийский.

В одновозрастных породах Карелии (обр. № 622, 642, 657), местонахождения которых расположены довольно близко друг от друга и в сходных в общем геологических условиях (низы карельской свиты нижнего протерозоя), модуль упругости показывает явную зависимость от количества цемента и пористости:

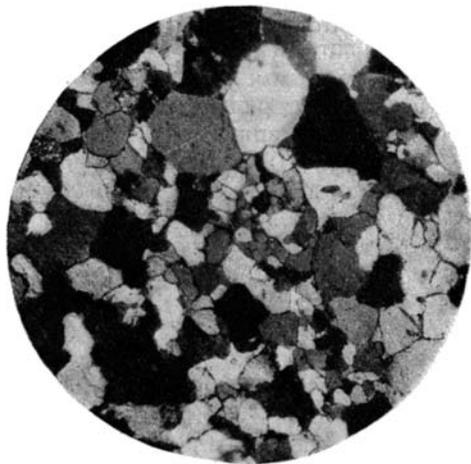
1) Обр. № 642 — типичный кварцит, почти лишенный цемента, с пористостью 0,37%; $E = 8,47 \cdot 10^5$ кг/см².

2) Обр. № 622 — светлосерый кварцито-песчаник подобного же типа с 12% цемента (фиг. 8) и 0,53% пористости; $E = 7,67 \cdot 10^5$ кг/см².

3) Обр. № 657 — зеленый кварцито-песчаник с 20% серицитово-хлоритового цемента, распределенного равномерно между округлыми зернами; пористость 1,42%; $E = 5,69 \cdot 10^5$ кг/см².



Фиг. 6. Кварцито-песчаник (Карелия), обр. № 448. С анализатором, $\times 20$



Фиг. 7. Кварцито-песчаник (Украина), обр. № 666. С анализатором, $\times 20$

Подробно вопрос о механических свойствах подобных кварцитов разобран И. П. Тимченко (1950).

3. Мраморы и мраморизованные известняки (табл. 3)

Так как резкой границы по структуре между мраморами и мраморизованными известняками провести нельзя, то и значения изучаемой константы для них образуют непрерывный ряд в пределах от 9,2 до $5,7 \cdot 10^5$ кг/см², что увязывается, в общем, с пористостью этих пород.

Если от мраморов и мраморизованных известняков перейти к однородным известнякам (табл. 4), то ряд может быть продолжен:

Обр. № 308 — мрамор плотный мелкозернистый, полнокристаллический; пористость 0,22%; $E = 9,16 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 385 — мраморизованный известняк кавказский; пористость 0,78%; $E = 7,37 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 691 — известняк золенгофенский; пористость 5,09%; $E = 5,94 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 628 — известняк подмосковный; пористость 10,95%; $E = 4,59 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 661 — известняк подмосковный; пористость 17,25%; $E = 2,63 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 632 — известняк подмосковный; пористость 25,6%; $E = 1,30 \cdot 10^5$ кг/см².

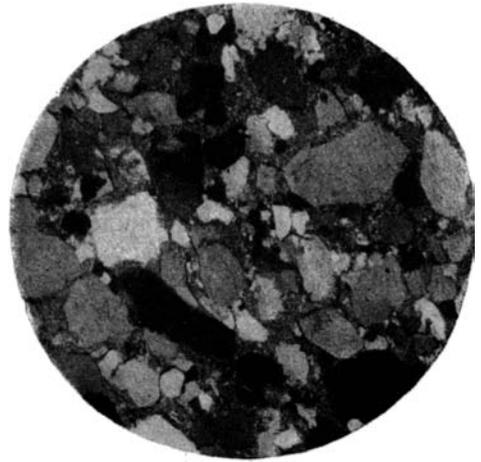
Следует отметить очень высокие абсолютные значения E для группы малопористых мраморов, например, для обр. № 308 (фиг. 9) и других.

4. Доломиты и известняки (табл. 4)

Значения E сильно колеблются, что связано со значительным разнообразием структур доломитов и известняков.



Фиг. 8. Кварцито-песчаник (Карелия), обр. № 622. С анализатором. $\times 20$



Фиг. 9. Мрамор мелкозернистый плотный (Узбекистан), обр. № 308. Без анализатора, $\times 20$



Фиг. 10. Доломит подмосковный, обр. № 638. Без анализатора, $\times 90$



Фиг. 11. Доломит подмосковный, обр. № 684. Без анализатора, $\times 90$

Хорошей иллюстрацией зависимости E от пористости могут служить два испытанных образца подмосковных равномернoзернистых доломитов совершенно одинаковой структуры (синдетической):

Обр. № 638 (фиг. 10), пористость 20,36%; $E = 2,81 \cdot 10^5$ кг/см².

Обр. № 684 (фиг. 11), пористость 6,02%; $E = 6,47 \cdot 10^5$ кг/см².

Золотогофенский литографский известняк — очень однообразная, литологически выдержанная порода — был испытан в качестве эталона для

сравнения с данными американских исследователей. Как видно из табл. 4 совпадение получилось вполне достаточным.

Данные о водорослево-фузулиновых доломитах Поволжья, выделяющихся своеобразной структурой, вынесены в следующую главу.

ОПЫТЫ С ДОЛОМИТАМИ ПОВОЛЖЬЯ

Для выяснения влияния влагонасыщения и мороза на модуль упругости была поставлена серия опытов над водорослево-фузулиновыми доломитами Поволжья, детально изученными в лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород в 1940 г. Испытания, проведенные сотрудником лаборатории К. С. Гоциридзе и обработанные затем нами, дали следующие результаты.

Призмы из 13 разновидностей доломитов и доломитизированных известняков исследовались в сухом состоянии. Затем половину призм подвергли свободному влагонасыщению до 200 суток, а другую половину — замораживанию и оттаиванию (до 200 циклов). Определения модуля производились через каждые 25—50—100 и 200 циклов замораживания¹ или суток насыщения. Полученные результаты сведены в табл. 5. Крайняя неравномерность цифр для одного и того же образца (призмы) зависит, вероятно, от недостаточной разработанности в то время методики измерения E . Колебания цифр для разных призм одной и той же породы зависят также от крайней неоднородности испытанных пород (по последнему вопросу см. статью Б. В. Залеского, В. В. Лапина и Н. С. Тер-Григорян, 1947). Колебания структуры так значительны, что в пределах одного блока размером $30 \times 30 \times 40$ см обычно встречаются участки с совершенно разной структурой и, следовательно, различными механическими свойствами. Это наглядно показывают первичные замеры E на сухих образцах пород — № 424, 426, 427 и др.

Доломиты тщательно изучались макро- и микроскопически В. В. Лапиным, причем разнообразие структур оказалось здесь столь большим, что для иллюстрации их потребовалось до 70 макро- и микрофотографий. Не располагая местом для подробного описания структур, ограничимся приведением только наиболее типичных примеров. Рассматриваемые породы могут быть разбиты на следующие группы:

- 1) Доломиты — обр. № 411, 412, 413, 420, 424, 422, 425, 426.
- 2) Известковистые доломиты — обр. № 418, 427.
- 3) Доломитизированные известняки — обр. 414, 419.
- 4) Известняки — обр. № 424.

Породы разных групп имеют много общих черт: значительную макро- и микропористость (до кавернозности включительно), перемежаемость плотных и пористых участков и обычно отрицательно-фузулиновый габитус (веретенообразные пустоты по форме фузулинов).

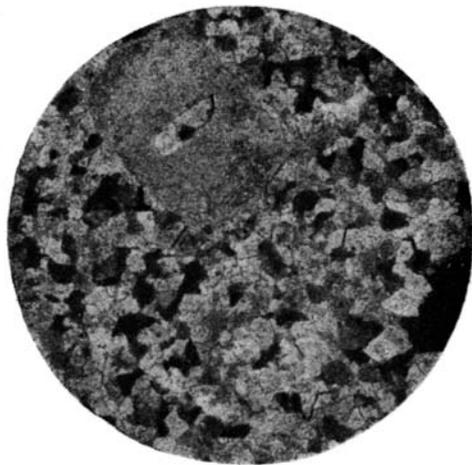
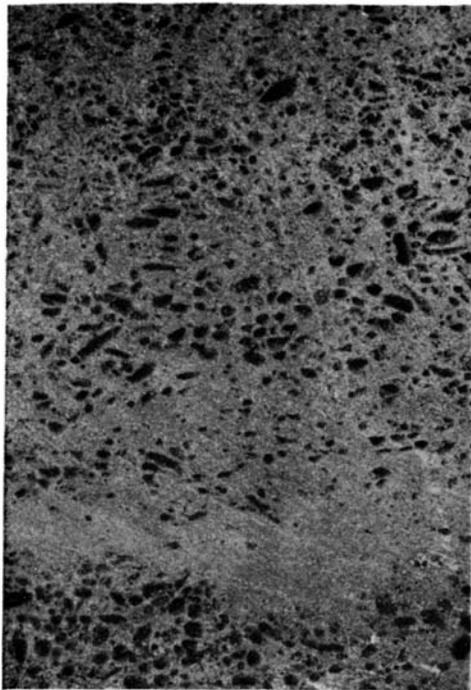
Типичным представителем доломитов можно считать обр. № 411. Макроскопически — это белая порода с сахаровидным изломом. Текстура ее обусловлена наличием большого числа веретенообразных пор диаметром до 1,5 мм, длиной до 5 мм. На фиг. 12 видно, что поры ориентированы в одной плоскости, являющейся плоскостью слоистости породы. Образцы для испытания были вырезаны из этого блока таким образом, что плоскости слоистости располагались параллельно действующему усилию.

Микроскопически — это равномернозернистая порода мозаичной структуры с крупными порами, состоящая из агрегатов доломитовых зерен, преобладающего размера от 0,09 до 0,24 мм в поперечнике. Большинство зерен доломита имеет ромбовидную форму (фиг. 13) меньшая часть —

¹ Испытывались оттаявшие образцы.

неправильную форму. В зернах доломита наблюдаются вроски микрокристаллического кальцита и включения органического вещества. Срастание зерен непосредственное. Изредка встречаются крупные кристаллы кальцита до 2 мм, представляющие собой, вероятно, остатки фауны. Подобная структура, получившая название синдетической, обуславливает обычно высокие механические свойства породы. Минералогический состав породы, по данным подсчета в шлифах (в объемн. %): кальцит — 7, доломит — 93; пористость — 15%.

Другие образцы из группы доломитов обычно сходны с описанным; исключение представляет обр. № 426, структурно похожий на обр. № 411, но отличающийся повышенной трещиноватостью.



Фиг. 12. Доломит (Поволжье), обр. № 411. Поверхность распила. Натур. величина

Фиг. 13. То же, микроструктура, обр. № 411. С анализатором, $\times 20$

Призмы были вырезаны из сильно трещиноватой части, вследствие чего часть их разрушилась еще при первом испытании, не дав определенных результатов. Трещиноватость не могла не сказаться на величине модуля E , показавшего несколько пониженное значение.

Среди группы известковистых доломитов (обр. № 418, 427) порода обр. № 418 характеризуется четко выраженной шаровой структурой с шариками доломита около 4—7 мм диаметром, отчетливо выделяющимися на выветрелой поверхности породы. Поверхность распила показана на фиг. 14, где видны концентрические оолиты доломита, сцементированные кальцитом, который заполняет также поры породы.

На фиг. 15 черные участки отвечают порам между шарами доломитового состава, серые участки — оолитам (размер от 0,05 до 0,012 мм), а светлые — цементирующему их кальциту, более мелкозернистому. Разрушения, а возможно, и деформации, происходят главным образом в промежутках между оолитами, чем обусловлено понижение механических свойств породы.

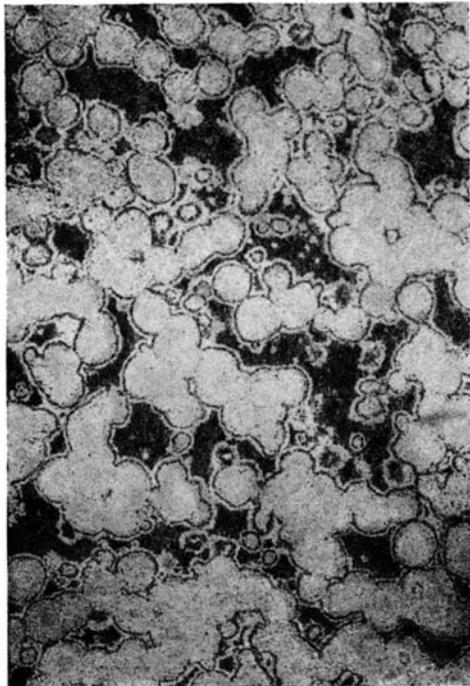
Минералогический состав описываемой породы (в объемн. %): кальцит — 16, доломит — 84; пористость — 9%.

Структура доломита синдетическая.

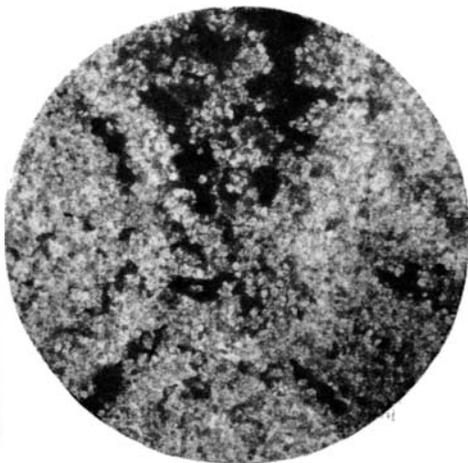
Доломитизированные известняки (обр. № 414 и 419) характеризуются

значительной пористостью (13—20%), пониженным содержанием доломита (40—48%) и диспергентной структурой. Все это ведет к понижению механических свойств породы.

Известняк (обр. № 424) — макроскопически темная, очень плотная порода, разбитая значительным количеством трещин шириною до 2—4 мм, переходящих иногда в каверны (фиг. 16). Под микроскопом ясно различим микробрекчиевидный характер породы: видны крупные обломки доломита и кальцита (до 15 мм), сцементированные мелкозернистой кальцитовой массой (0,007—0,010 мм). Порода сильно трещиновата, зерна карбонатов раздроблены,



Фиг. 14. Известковистый доломит, обр. № 418. Поверхность распила (видна оолитовая структура). Натур. величина



Фиг. 15. То же, микроструктура, обр. № 418. С анализатором, $\times 15$

сдвойникованы. Минералогический состав известняка (в объемн. %): кальцит — 94, доломит — 6; пористость — 3%.

Пористость сильно понижена за счет заполнения пор мелкозернистым кальцитовым материалом. Несмотря на малую пористость, порода обладает пониженной прочностью, обусловленной механическими повреждениями.

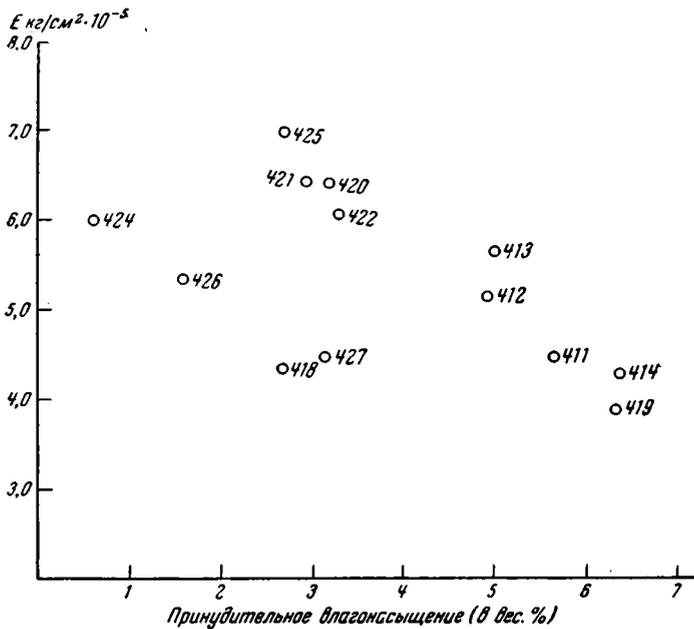
Приведенные соотношения между пористостью и упругостью показаны на диаграмме фиг. 17, где по ординате отложены значения E , а по абсциссе — величины принудительного весового влагонасыщения (прямо пропорционального пористости), полученного при давлении 150 атм.

Как видно из этой диаграммы, почти все доломиты, за исключением породы обр. № 426, отличающейся повышенной трещиноватостью, укладываются на линию, приближающуюся к прямой: зависимость E от пористости в этом частном случае получается почти прямолинейной. Из этого закона выпадают породы, лишенные зияющих пор, т. е. цементированные кальцитом; об особенностях их структуры было сказано раньше. Сопоставление кажущейся пористости и прочности не дает отчетливой закономерности.

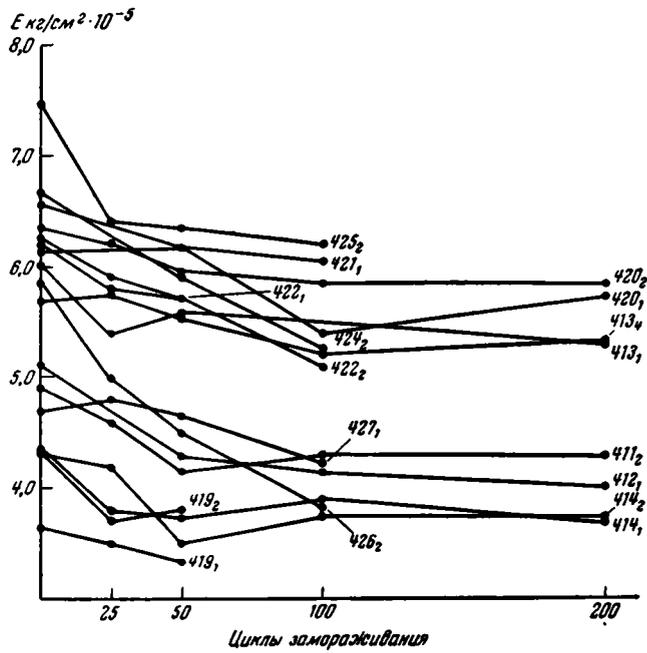
Результаты поставленного лабораторией эксперимента — определение влияния замораживания и влагонасыщения на величину E — показаны на диаграммах фиг. 18 и 19, где по ординатам отложены величины E (в $\text{кг}/\text{см}^2$), а по абсциссе — число суток насыщения или циклов



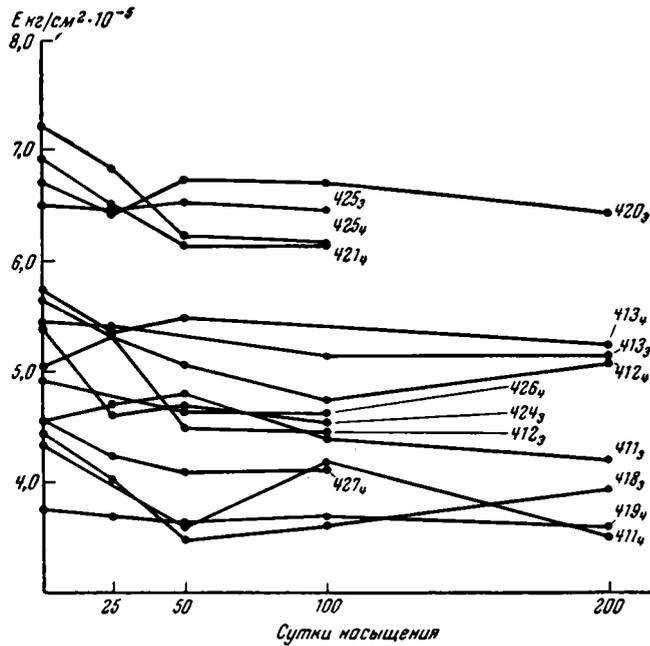
Фиг. 16. Известняк (Поволжье), обр. № 424. Поверхность распила. Натур. величина



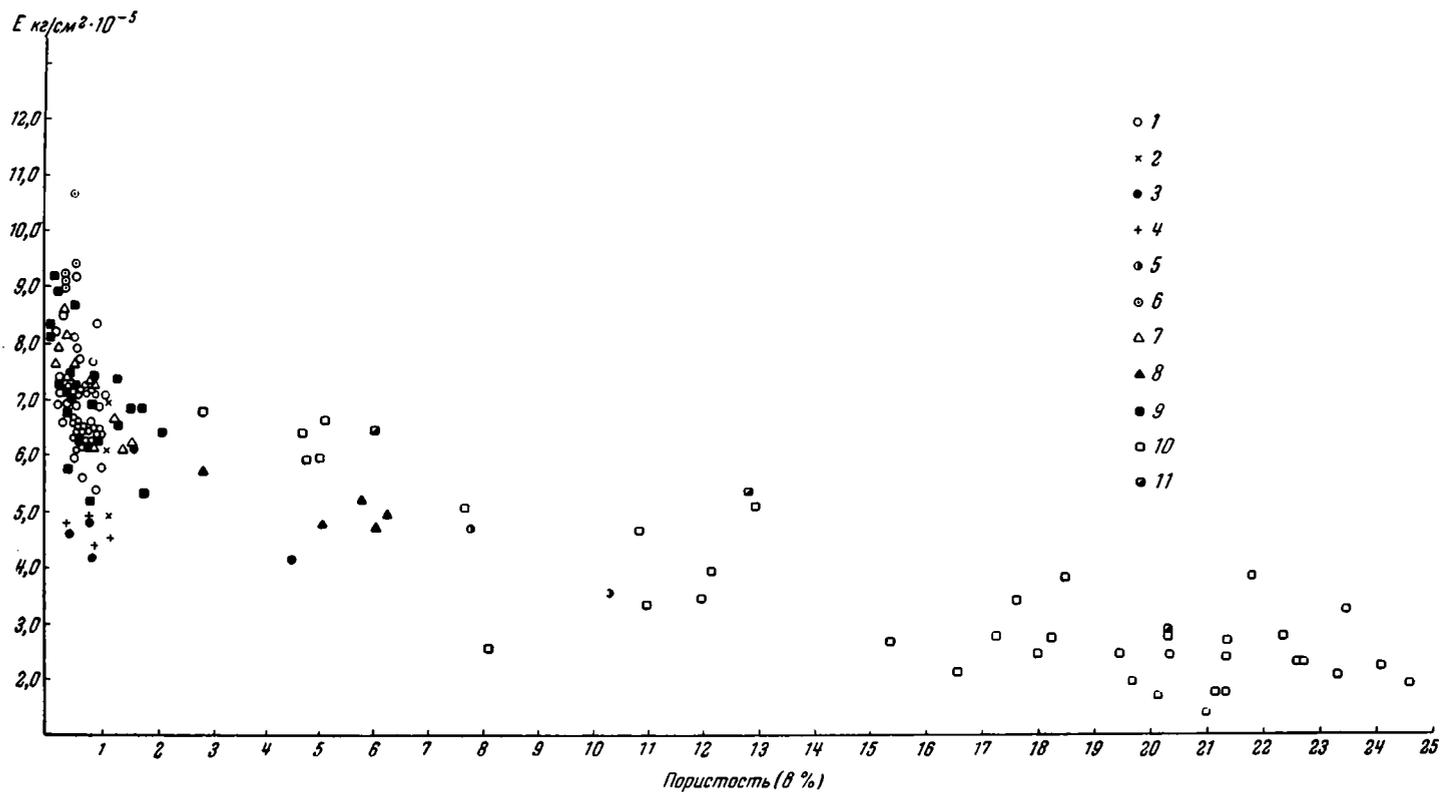
Фиг. 17. Зависимость модуля упругости E доломитов Поволжья от величины влагонасыщения



Фиг. 18. Влияние замораживания на модуль упругости доломитов Поволжья



Фиг. 19. Влияние влагонасыщенности на модуль упругости доломитов Поволжья



Фиг. 20. Сводная диаграмма зависимости модуля упругости от пористости

1 — платформенные граниты свежие; 2 — то же выветрелые; 3 — геосинклинальные граниты свежие; 4 — то же выветрелые; 5 — бештауниты; 6 — основные породы; 7 — кварциты; 8 — песчаники; 9 — мраморы; 10 — известняки; 11 — доломиты

замораживания. Поведение каждой призмы изображается своей ломаной линией, показывающей изменение упругих свойств доломитов по мере удлинения срока воздействия.

Несмотря на то, что методика определения E во время выполнения эксперимента не была установлена¹, а большая неоднородность пород всегда влечет за собой разнообразие цифр даже для одной и той же призмы, диаграммы показывают не только самый факт значительного понижения модуля упругости от воздействия влаги и мороза, но и характер изменения — заметное выполаживание ломаных линий после 50 циклов.

РАЗБОР СВОДНОЙ ДИАГРАММЫ

Разобрав каждую из выделенных петрографических групп в отдельности, попытаемся установить на основании имеющегося материала общие закономерности для модулей упругости горных пород. Нами составлена сводная точечная диаграмма (фиг. 20), где по ординате отложены значения E , а по абсциссе — соответствующая эффективная пористость. Хотя диаграмма страдает некоторыми недостатками: отсутствием точек для пород средней пористости (песчаников и сланцев) и большим сгущением точек в области малопористых пород, она позволяет все же сделать следующие выводы:

1. Значение модуля упругости E (модуля Юнга) для большинства пород в общем закономерно понижается с повышением пористости: наибольшим модулем характеризуются породы, почти лишенные пор, для сильнопористых пород модуль весьма мал.

2. Это правило действительно для пород с равномерно распределенной пористостью; если в характере распределения ее наблюдаются отклонения от нормы, как это имеет место для отрицательно-фузулиновых доломитов Поволжья, то закономерность выражается собственной кривой.

3. Из того, что породы одинаковой пористости, но разной твердости (кварциты, граниты и мраморы) находят себе место в одном поле диаграммы, следует весьма важное заключение: в пределах примененных нагрузок минералогический состав мало влияет на величину упругости. Деформации, наблюдаемые нами при одноосном сжатии, возникают, вероятно, за счет закрытия пор, каверн, а также за счет интергранулярных движений упругого характера. Кристаллические решетки минералов деформируются при данных давлениях лишь отчасти или вовсе не деформируются. Определенные нами модули E являются, таким образом, величинами, хотя и практически важными, но условными, характеризующими не вещество, а скорее структуру камня, т. е. соотношения в гетерогенной системе минерал — воздух². Для получения истинных E требуется производить измерение деформаций после закрытия пор, т. е. в области еще более высоких давлений: тогда модули упругости породы могут быть сравниваемы с таковыми монокристалльных минералов.

4. Графический метод сопоставления свойств пород вполне себя оправдывает; на сводной диаграмме хорошо видна разница в свойствах кавказских и украинских гранитов, хорошо выделяется особая группа доломитов Поволжья и т. д.

Для составления полной диаграммы необходимо продолжить и расширить исследования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Произведено большое число (140) определений модуля упругости при сжатии — весьма важной для науки и практики константы горных пород.

¹ Повторить эти опыты мы не имели возможности.

² Подробнее об этом см. Ю. В. Ризниченко (1949).

2. Исследования показали, что модуль упругости является весьма точно определяемой константой горных пород, допускающей к тому же повторные определения на одном и том же образце.

3. При давлениях выше 150 кг/см^2 деформации горных пород могут быть представлены в виде слабо вогнутых кривых, т. е. эти деформации не вполне подчиняются закону Гука. Модуль упругости имеет тенденцию к повышению с ростом приложенных нагрузок.

4. Установлена простая зависимость величины модуля от структурных особенностей пород, в частности от пористости.

5. В пределах примененных нагрузок минералогический состав пород и соответствующая ему твердость мало влияют на величину модуля: мраморы, кварциты и граниты попадают в одно поле диаграммы.

6. Для выяснения зависимости модуля упругости от структурных признаков внутри отдельных групп данных явно недостаточно; исследование необходимо расширять, используя только свежие образцы из карьеров. Весь каменный материал обязательно должен быть ориентированным; желательно, поэтому, чтобы образцы отбирались геологами.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Белаяенко Ф. А. Свойства горных пород с точки зрения управления кровлей. ОНТИ, 1936.
- Белаяенко Ф. А. Пути к разрешению проблем по управлению кровлей. Сб. трудов Ком. по упр. кровлей. ГНТИ Украины, 1937.
- Беликов Б. П. Физико-механическое и геолого-петрографическое исследование удул-камского гранита. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1948, вып. 89, сер. петрограф., № 28.
- Белянкин Д. С. О специализации по каменным строительным материалам в Академии Наук СССР. Вестн. Акад. Наук СССР, 1945, № 9.
- Белянкин Д. С., Залесский Б. В. и Беликов Б. П. О работах Академии Наук СССР в области изучения строительного и облицовочного камня. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1948, вып. 89, сер. петрограф., № 28.
- Гришкова Н. П. Определение механических свойств и упругих постоянных горных пород Донбасса. Сб. трудов Ком. по упр. кровлей. ГНТИ Украины, 1937.
- Ефимов Г. П. Прибор конструкции ИМС для определения модуля упругости горных пород. Мин. сырье, 1937, № 1.
- Залесский Б. В. Вопросы физико-механической и петрографической характеристики горных пород в связи с оценкой их буримости. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1948, вып. 89, сер. петрограф., № 28.
- Залесский Б. В. и Беликов Б. П. Физико-механические исследования и опыт определения долговечности главнейших типов облицовочных камней из месторождений СССР. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1948, вып. 89, сер. петрограф., № 28.
- Залесский Б. В., Лапин В. В. и Тер-Григорян Н. С. Влияние степени однородности карбонатных пород на их физико-механические свойства. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1947, вып. 84, сер. петрограф., № 27.
- Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1947.
- Нестеров Л. Я. Физические свойства песчаников, известняков и сланцев. Матер. Центр. научно-исслед. геологоразв. инст., Геофизика, 1940, № 8.
- Нестеров Л. Я. и Нестерова М. Я. Сравнительное изучение некоторых физических свойств изверженных пород северо-восточного Приазовья и Карелии. Матер. Центр. научно-исслед. геологоразв. инст., Геофизика, 1940, № 8.
- Ризниченко Ю. В. О распространении сейсмических волн в дискретных и гетерогенных средах. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геофиз., 1949, 13, № 2.
- Тимченко И. П. Протерозойские кварциты и кварцито-песчаники центральной и южной Карелии. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1950, вып. 122, сер. петрограф., № 37.
- Цимбаревич П. М. Механика горных пород. Углетехиздат, 1948.
- Virch F. Elasticity, Sect. 5. Handbook of physical constants. Bull. Geol. Soc. Amer., 1942, spec. pap., N 36.
- Zisman W. A. 1. Young's modulus and poisson ratio with reference to geophysical applications. Proc. Nat. Acad. Sci., 1933, 19, N 7.
- Zisman W. A. 2. Comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rocks. Proc. Nat. Acad. Sci., 1933, 19, N 17.

Граниты и другие изверженные породы

№ обр.	Название породы	Ориентирка расстояния относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принадлежное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Капущая пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

У к р а и н а

314 ₂	Гранит биотитовый серый среднезернистый	—	6,86	6,91	6,90	6,92	300—900	0,17	2,64	0,45	3380
314 ₃	То же	—	6,59	7,17	6,93		300—900				
318 ₁	Гранит розовый среднезернистый с глубины 5 м (загнотун выветриванием)	—	5,33	5,63	5,47	5,40	230—760	0,32	2,61	0,83	2290
318 ₂	То же	—	5,12	5,44	5,28		210—690				
833	То же с глубины 15—18 м	—	5,37	6,00	5,69	5,69	200—800	0,24	2,63	0,63	—
835	То же с глубины 38—41 м	—	5,26	6,22	5,96	5,96	200—800	0,19	2,64	0,50	—
441 ₁	Гранит биотитовый зеленовато-серый среднезернистый	—	7,44	7,70	7,57	7,71	200—900	0,33	2,64	0,87	—
441 ₂	То же	—	7,95	7,78	7,86		200—800				
625 ₁	Гранит биотитовый серый порфировидный	—	7,50	7,61	7,56	7,32	300—1000	0,28	2,68	0,75	2270
625 ₂	То же	—	7,08	7,09	7,09		300—1000				
626 ₁	Гранит биотитовый, оранжево-красный (тип рапакиви)	—	6,88	6,96	6,92	7,07	250—1020	0,41	2,65	1,09	2410
626 ₂	То же	—	7,17	7,29	7,23		250—830				
629 ₁	Гранит серый (то же, что обр. № 441)	—	6,97	7,05	7,01	7,63	250—1100	0,26	2,66	0,69	2840
629 ₂	То же	—	8,12	8,41	8,33		370—1210				
641 ₁	Гранит бурый серый порфировидный, с крупными вкрапленниками микроклина	—	6,76	7,10	6,93	6,90	250—1080	0,35	2,65	0,93	3020
641 ₂	То же	—	6,72	7,05	6,88		250—1080				

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давлений относительно слоев	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Кажущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
674 ₁	Гранит биотитовый розовато-серый с крупными порфировидными вкрапленниками микроклина	⊥	6,26	6,71	6,48	6,40	270—890	0,20	2,73	0,55	1990
674 ₂	То же . . .	⊥	6,12	6,44	6,28		270—910				
674 ₃	» » . . .		7,01	7,35	7,18		180—910				
674 ₄	» » . . .		6,55	7,10	6,96		270—890				
675 ₁	Гранит биотитовый красный среднезернистый ¹ . . .		7,02	7,30	7,16	7,21	180—1180	0,17	2,66	0,45	2730
675 ₃	То же . . .		7,10	7,44	7,27		300—1200				
675 ₂	» » . . .	⊥	7,13	7,43	7,28		190—1210				
675 ₄	» » . . .	⊥	7,50	7,11	7,48		300—1200				
678 ₁	Гранит серый биотитовый, с гранатом в виде крупных вкраплений . . .	—	6,83	7,04	6,93	6,91	200—1200	0,14	2,74	0,31	2040
678 ₂	То же . . .	—	6,78	7,03	6,90		200—1100				
696 ₁	Гранит бурозернистый . . .	—	7,06	7,40	7,23	7,23	300—900	0,31	2,66	0,82	—
716 ₁	Гранит серый крупнозернистый		7,94	8,21	8,07	8,07	300—1100	0,19	2,84	0,54	2410
716 ₂	То же . . .	⊥	7,87	8,15	8,01		8,01				
717 ₁	Гранит красный крупнозернистый		6,92	7,22	7,07	7,07	300—1000	0,31	2,65	0,82	2590
717 ₂	То же . . .	⊥	6,64	6,95	6,79		6,79				
719 ₁	Гранит биотитовый серый крупнозернистый	—	7,16	7,62	7,39	7,31	300—900	0,19	2,65	0,50	2680 ²
719 ₂	То же . . .	—	7,11	7,38	7,24		7,24				
721 ₁	Гранит биотитовый желто-серый среднезернистый . . .		6,24	6,45	6,34	6,34	100—1100	0,19	2,63	0,50	2820
721 ₂	То же . . .	⊥	6,68	6,87	6,77		6,77				

¹ Коэффициент Пуассона — 0,282.² Временное сопротивление сжатию в ⊥ ориентировке.³ То же в || ориентировке.

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка направления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-5}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Приведенное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Кажущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
724 ₁	Гранит биотитовый серый среднезернистый		6,06	6,45	6,25	6,29	100—800	0,28	2,63	0,73	{ 3020 2880
724 ₂	То же		6,10	6,59	6,34	200—1100					
727 ₁	Гранит биотитовый серый крупнозернистый		6,44	6,72	6,58	6,58	100—900	0,27	2,67	0,72	{ 2410 2440
727 ₂	То же	⊥	5,98	6,38	6,18	6,18	100—800				
728 ₁	Гранито-гнейс серый, биотитовый мелкозернистый		6,19	6,58	6,39	6,39	100—900	0,31	2,62	0,81	{ — 2830
728 ₂	То же	⊥	6,22	6,46	6,34	6,34	100—900				
729 ₁	Гранит биотитовый красный среднезернистый		5,92	6,31	6,11	6,11	100—900	0,30	2,63	0,79	{ — 3080
729 ₂	То же	⊥	6,58	6,80	6,69	6,69	100—800				
731 ₁	Гранит биотитовый красный среднезернистый		7,20	7,45	7,33	7,33	200—1000	0,24	2,65	0,63	{ 2910 3010
731 ₂	То же	⊥	6,79	7,11	6,95	6,95	100—900				
742 ₁	Гранит биотитовый темносерый крупнозернистый		8,68	8,77	8,72	8,54	100—1000	0,11	2,72	0,30	{ — — 3020 —
742 ₂	То же		8,07	8,65	8,36	8,21	100—1000				
742 ₃	» »	⊥	8,35	8,49	8,41	8,21	100—900				
742 ₄	» »	⊥	8,00	8,04	8,02	8,21	100—1000				
743 ₁	Гранит биотитовый красный среднезернистый		7,12	7,56	7,34	7,07	200—900	0,23	2,64	0,61	{ — 2700
743 ₂	То же		6,64	6,97	6,80	7,07	100—900				
753 ₁	Гранит биотитовый серо-розовый крупнозернистый свежий		7,02	7,23	7,12	7,21	100—800	0,23	2,67	0,61	{ 2410 ² 2300 ²
753 ₂	То же		7,19	7,41	7,30	7,21	200—900				

¹ Временное сопротивление сжатию в || ориентировке.

² То же в ⊥ ориентировке.

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Канальная пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
832 ₃	Гранит красный биотитовый среднезернистый, с поверхности . . .	⊥	5,73	6,45	6,09	6,09	200—900	0,21	2,67	0,56	{2170 ¹ 2260 ² }
832 ₄	То же . . .		5,69	6,42	6,05	6,05	200—900				
754 ₁	Гранит биотитовый светлосерый, среднезернистый		6,05	6,48	6,27	6,27	100—800	0,29	2,64	0,76	{2150 2210}
754 ₂	То же	⊥	6,31	6,66	6,48	6,48	100—800				
755 ₁	Гранит биотитовый красный среднезернистый		6,55	6,91	6,73	6,79	200—900	0,23	2,66	0,61	{2480 2600 ³ }
755 ₂	То же		6,75	6,98	6,86	6,79	200—900				
756 ₁	Гранит биотитовый красный	⊥	6,71	7,24	6,97	6,97	100—800	0,44	2,69	1,18	1970
831 ₁	То же с поверхности . . .		4,71	5,19	4,95	4,95	200—900	0,44	2,69	1,18	1870
757 ₁	Гранит биотитовый серый среднезернистый		6,56	7,02	6,79	6,79	100—800	0,28	2,64	0,73	{2320 2540}
757 ₂	То же	⊥	6,31	6,58	6,44	6,44	100—800				
829 ₁	Гранит розово-красный среднезернистый	⊥	6,07	6,56	6,32	6,32	200—900	0,36	2,67	0,96	{2530 2730}
829 ₂	То же		5,99	6,46	6,22	6,22	100—900				
830 ₁	» »	⊥	6,17	6,67	6,42	6,42	100—900	0,37	2,67	0,98	{2390 2370}
830 ₂	» »		5,54	6,05	5,80	5,80	200—900				
840 ₁	Гранит красный крупнозернистый . . .	⊥	5,54	6,52	6,03	6,03	200—800	0,40	2,69	1,07	{1800 1980}
840 ₂	То же		5,61	6,38	6,00	6,00	200—800				
853 ₁	Гранит розовый крупнозернистый . . .	—	5,54	5,99	5,77	5,77	200—900	0,37	2,71	1,00	2070

¹ Временное сопротивление сжатию в ⊥ ориентировке.² То же в || ориентировке.³ То же в ⊥ ориентировке.

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-5}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Канущая пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
855 ₁	Гранит серо-розовый крупнозернистый	⊥	6,37	6,97	6,67	6,67	200—800	0,20	2,73	0,55	{2360 2320}
855 ₂	То же . . .		6,89	7,37	7,13	7,13	200—900				
768 ₁	Гранито-гнейс		7,25	7,55	7,40	7,40	100—900	0,11	2,73	0,30	{— 2820}
768 ₂	То же	⊥	6,89	7,39	7,14	7,14	100—800				
784 ₁	Гранито-гнейс		7,87	8,06	7,96	7,96	100—800	0,08	2,72	0,22	{— 3080}
784 ₂	То же	⊥	8,12	8,25	8,19	8,19	100—800				
854 ₁	Гранит розовато-серый . .		7,66	8,01	7,83	7,83	200—900	0,23	2,76	0,63	{2370 2550}
854 ₂	То же	⊥	7,67	8,01	7,84	7,84	200—1000				

Карелия и Ленинградская область

504 ₁	Гранит красный крупнозернистый (типа рапакиви) . .	—	6,46	6,63	6,55	6,46	200—800	0,36	2,62	0,94	2200
504 ₂	То же	—	6,20	6,56	6,38		200—800				
673 ₁	Гранит розовый среднезернистый (с амезистом)	—	6,19	6,40	6,29	6,31	173—690	0,38	2,62	0,99	2720
673 ₂	То же	—	6,09	6,59	6,34		150—620				
212 ₇	Гранит среднезернистый розово-серый	—	7,96	8,30	8,13	8,37	200—1000	0,37	2,66	0,98	2760
213	То же	—	8,51	8,74	8,62		200—1000				
222 ₄	Гранит такого же типа . .	—	8,54	8,92	8,73	8,52	400—1000	—	—	—	—
222 ₆	То же	—	8,26	8,38	8,32		200—1000				
764 ₁	Гранит биотитовый красный	⊥	6,82	7,35	7,08	7,08	100—800	0,28	2,68	0,75	1950
764 ₂	То же		7,17	7,48	7,32	7,32	100—900				
787 ₁	Гранито-гнейс серо-розовый		7,32	7,59	7,46	7,46	100—800	0,19	2,65	0,50	2690 2750
787 ₂	То же	⊥	6,51	6,81	6,66	6,66	100—700				
791 ₁	Гранит биотитовый красный крупнозернистый		6,92	7,39	7,15	7,15	100—700	0,20	2,65	0,53	2430 2400
791 ₂	То же	⊥	6,49	6,70	6,59	6,59	100—800				

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка плавления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-5}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Канущая пористость (в объем. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
792 ₁	Гранит биотитовый красный крупнозернистый . .		7,24	7,43	7,34	7,34	100—800	0,20	2,66	0,53	{ 2330 2290
792 ₂	То же . . .	⊥	6,91	7,29	7,10	7,10	100—800				
793 ₁	Гранит биотитовый красный крупнозернистый . .		6,67	6,99	6,83	6,83	100—700	0,21	2,66	0,55	{ 2250 2410
793 ₂	То же . . .	⊥	6,71	7,07	6,89	6,89	100—700				
794 ₁	» » . . .		6,48	6,77	6,63	6,63	100—700	0,15	2,65	0,39	{ 2630 2400 2470
795 ₁	» » . . .		7,21	7,53	7,37	7,37	100—700				
795 ₂	» » . . .	⊥	7,17	7,43	7,30	7,30	100—800	0,15	2,65	0,39	
884 ₁	Гранито-гнейс гранатовый	⊥	8,85	9,44	9,14	9,14	200—1000	0,21	2,87	0,60	2730
884 ₂	То же		10,38	10,54	10,45	10,45	200—1000				

К а в к а з

363	Древние граниты Гранит светлосерый биотитово-мусковитовый мелкозернистый (из зоны надвига)	—	4,13	4,70	4,41	4,41	200—840	0,34	2,63	0,89	1700
444 ₁	Гранит светлосерый мелкозернистый биотитовый . . .	—	4,44	5,40	4,92	4,87	80—460	0,34	2,66	0,39	1980
444 ₂	То же . . .	—	4,36	5,09	4,72		80—460				
444 ₃	» » . . .	—	4,24	5,15	4,69		80—460				
444 ₄	» » . . .	—	4,60	5,68	5,14		80—480				
445 ₁	Гранит такого же типа . .	—	4,14	5,28	4,71	4,96	80—460	0,28	2,66	0,74	2150
445 ₂	То же . . .	—	4,34	5,37	4,85		80—450				
445 ₃	» » . . .	—	4,61	5,98	5,29		80—480				
445 ₄	» » . . .	—	4,80	5,63	4,97		80—480				
446 ₁	Гранит светлосерый такого же типа . .	—	3,95	4,77	4,36	4,51	80—470	0,44	2,65	1,17	1800
446 ₂	То же . . .	—	4,11	4,83	4,47		80—480				
446 ₃	» » . . .	—	4,14	5,01	4,57		80—470				
446 ₄	» » . . .	—	4,19	5,11	4,65		80—460				

Таблица 1 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка наклонения относительно плоскости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-3}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Набухающая пористость (в об'емн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
517 ₁	Гранит светлосерый такого же типа как обр. № 441 . . .	⊥	4,41	4,97	4,69	4,71	90—540	0,28	2,67	0,75	2380
517 ₂	То же . . .	⊥	4,49	4,98	4,73		90—530				
517 ₃	» » . . .		4,66	5,06	4,86	4,89	90—540	0,28	2,67	0,75	2390
517 ₄	» » . . .		4,69	5,17	4,93		90—540				
519 ₁	» » . . .	—	3,58	4,27	3,92	4,20	80—480	0,28	2,67	0,75	2390
519 ₂	» » . . .	—	3,63	4,24	3,94		80—480				
519 ₃	» » . . .	—	4,24	4,70	4,47	4,58	90—500	0,17	2,67	0,45	2300
519 ₄	» » . . .	—	4,22	4,70	4,46		90—500				
520 ₁	» » . . .	—	4,34	4,85	4,60	4,58	80—470	0,17	2,67	0,45	2300
520 ₂	» » . . .	—	4,27	4,86	4,56		80—480				
520 ₃	» » . . .	—	4,32	4,59	4,46	4,58	80—480	0,17	2,67	0,45	2300
520 ₄	» » . . .	—	4,43	4,98	4,70		80—480				
Молодые граниты											
639 ₁	Гранит среднезернистый, светлосерый роговообманковый	—	6,10	6,33	6,22	6,13	270—1180	0,60	2,65	1,59	2800
639 ₂	То же . . .	—	5,97	6,13	6,05		250—1120				
372 ₁	Гранит светлосерый порфировидный кавернозный . . .	—	3,89	4,39	4,14	4,21	200—800	1,75	2,59	4,53	1940
372 ₂	То же . . .	—	3,96	4,60	4,28		300—800				
Разные изверженные породы											
310 ₁	Бештаунит желтый пористый	—	3,38	3,60	3,49	3,49	200—800	4,45	2,33	10,37	1980
311 ₁	Бештаунит серый менее пористый	—	4,77	5,06	4,91	4,58	200—900	3,24	2,43	7,87	1580
311 ₂	То же	—	4,02	4,47	4,25		200—800				
208 ₂	Диабаз карельский . . .	—	11,24	11,50	11,37	10,86	300—1000	0,06	3,00	0,18	3300
208 ₃	То же	—	10,06	10,64	10,35		300—1000				
373 ₁	Лабрадорит серый	—	8,86	9,10	8,98	8,98	170—765	0,15	2,68	0,40	2430
956 ₁	Лабрадорит свежий крупнозернистый, с Украины . . .	—	8,86	9,26	9,06	9,06	300—900	0,16	2,88	0,46	1880

Таблица 1 (окончание)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давлений относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Канущая пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
957 ₁	Лабрадорит свежий крупнозернистый, с Украины . . .	⊥	9,28	9,46	9,37	9,37	200—900	0,22	2,89	0,63	1990
957 ₂	То же . . .		8,52	9,20	8,86	8,86	200—900				
958 ₁	» » . . .		9,04	9,22	9,13	9,13	300—900	0,16	2,89	0,46	2110
883 ₁	Норит серозеленоватый среднезернистый (друзит), из Карелии . . .	—	10,35	11,09	10,72	10,72	200—900	0,18	3,28	0,62	3100
312	Анортозит белый жильный	—	8,49	8,86	8,68	8,68	200—800	0,13	2,62	0,34	3310
232 ₁	Брекчия вулканическая . . .	—	5,62	6,76	6,19	6,19	400—900	0,38	2,90	1,10	1790
720	Диопсидит искусственный («московский камень»)	—	5,49	5,80	5,64	5,64	100—900	2,17	2,76	5,99	4860

Кварциты и песчаники

№ обр.	Название породы	Ориентиро- вано по давлению относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10 ⁻⁴				Интервал давлений, (в кг/см ²)	Принудительное вла- гонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Кажущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление на сжатие (в кг/см ²)
			при нагруз- ке	при разгруз- ке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Южный Урал, Белорецкий район

602	Кварцит сливной розовый из зигальгинской свиты (докембрий?)	—	7,50	7,79	7,64	7,64	200—900	0,06	2,68	0,16	3570
603	Кварцито-песчаник белый (нижний силур)	⊥	5,87	6,42	6,14	6,14	200—1000	0,34	2,66	0,90	3350
604	Кварцит белый из зигальгинской свиты (докембрий) .	—	5,90	6,53	6,21	6,21	400—800	0,60	2,65	1,59	3480
605	То же	—	6,99	7,51	7,25	7,25	300—900	0,35	2,63	0,92	3100
607	Кварцит слоистый, свита «М» (докембрий?) .	—	7,19	7,60	7,39	7,39	200—1000	0,17	2,64	0,45	3850
619	Кварцит слоистый из зигальгинской свиты	—	6,51	6,83	6,67	6,67	280—1200	0,47	2,64	1,24	3840
621 ₂	Кварцито-песчаник лилово-красный (нижний силур) . .	⊥	7,05	7,50	7,28	7,28	250—1080	0,32	2,65	0,85	3220
621 ₁	То же		7,61	7,87	7,74	7,74	290—1330				

Карелия

622 ₁	Кварцито-песчаник светлосерый из низов карельской свиты нижнего протерозоя . .		7,50	7,84	7,67	7,67	250—1070	0,20	2,67	0,53	2900
622 ₂	То же	⊥	7,41	7,64	7,52	7,52					
642 ₁	Кварцит белый очень плотный, из той же свиты		8,42	8,52	8,47	8,47	260—1120	0,14	2,65	0,37	3910 ⁷ 4200
642 ₂	То же	⊥	7,84	7,97	7,91	7,91	270—1180				
657 ₁	Кварцито-песчаник зеленый из той же свиты	⊥	5,79	6,28	6,03	6,03	270—1180	0,53	2,68	1,42	1850 1780
657 ₂	То же		5,44	5,94	5,69	5,69	300—1300				

Таблица 2 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-3}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Кажущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
448 ₁	Кварцито-песчаник красный, из ютнийской свиты верхнего протерозоя . . .	⊥	7,83	8,50	8,21	8,21	150—740	0,15	2,66	0,40	3280
Украина											
666 ₁	Кварцито-песчаник розовый ютнийский	—	8,49	8,92	8,71	8,60	250—830 330—1110	0,14	2,64	0,37	—
666 ₂	То же	—	8,31	8,70	8,50						
Песчаники Самарской луки											
366 ₃	Песчаник белый с опаловым цементом	—	4,74	4,70	4,72	4,70	20—200 200—290	2,2	2,33	5,13	2130
366 ₄	То же	—	4,66	4,73	4,69						
367 ₁	»	—	4,83	4,91	4,87	4,64	20—200 2—200	2,7	2,25	6,07	2000
367 ₂	»	—	4,46	4,38	4,42						
368 ₂	»	—	4,87	5,17	5,02	4,97	20—230 20—200	2,7	2,35	6,34	2100
368 ₃	»	—	4,86	5,00	4,93						
369 ₂	Песчаник с халцедоновым цементом . . .	—	5,52	6,01	5,76	5,76	20—200	1,2	2,42	2,90	2730
370	То же	—	5,05	5,34	5,20						

Мраморы и мраморизованные известняки

№ обр.	Название породы	Ориентировка направления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}				Интервал давления (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Канущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

(Мраморы)

Урал

309	Мрамор белый плотный среднезернистый	—	5,30 5,36	6,34 6,08	5,82 6,72	5,75	150—550 100—550	0,17	2,71	0,46	1280
386	Мрамор мелкозернистый серый слоистый		8,67	8,68	8,68	8,68	150—500	0,22	2,71	0,60	1610
397 ₂	Мрамор брекчиевидный красный	—	6,97	7,34	7,15	7,15	200—800	0,16	2,70	0,43	1450
398 ₁	Мрамор белый	—	6,26	7,04	6,65	6,79	120—480	0,18	2,71	0,49	1150
398 ₂	То же	—	6,57	7,31	6,94		120—480				
451 ₁₅	Мрамор слоистый желто-бурый	—	6,02	6,74	6,38	6,26	240—400	0,37	2,70	1,00	780
451 ₁₆	То же	—	5,93	6,37	6,15		240—400				

Западные Саяны

304 ₁	Мрамор белый		7,04	7,50	7,27	7,27	200—800	0,13	2,72	0,35	1160
20	Мрамор розовый		8,71	9,03	8,87	8,87	200—800	0,09	2,71	0,24	1900

Узбекистан

307 ₁	Мрамор розовый		7,95	8,23	8,09	8,09	200—900	0,06	2,72	0,16	1580
308 ₁	Мрамор серый		9,07	9,26	9,16	9,16	200—600	0,08	2,72	0,22	1830
322 ₁	Мрамор белый		8,20	8,44	8,32	8,32	200—800	0,04	2,70	0,11	1810

Карелия

452	Мрамор розовый	—	7,23	7,69	7,46	7,46	150—550	0,17	2,84	0,48	1980
-----	--------------------------	---	------	------	------	------	---------	------	------	------	------

Закарпатье

758	Мрамор серый слоистый		7,48	7,89	7,68	7,68	100—600	0,22	2,76	0,60	(1590 1990)
	То же	⊥	5,99	6,54	6,26	6,26	100—600				

Таблица 3 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давления относительно слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-5}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Каждущая пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатия (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Мраморизованные известняки
Закарпатье

713	Мраморизованный известняк красный		5,12	5,66	5,39	5,39	150—550	0,46	2,68	1,24	1250
714 ₁	То же, розовый		6,60	6,94	6,77	6,77	100—500	0,63	2,68	1,69	1540
714 ₂	»	⊥	6,57	6,97	6,77	6,77	150—500				
715	То же, желтый		5,84	6,92	6,38	6,38	150—600	0,78	2,68	2,10	
785 ₁	То же, красный		6,54	6,93	6,73	6,73	100—600	0,59	2,69	1,58	1990
785 ₂	»	⊥	6,58	7,05	6,81	6,81	150—600				

Грузия

380 ₁	Мраморизованный известняк красный с белыми пятнами		7,14	7,09	7,11	6,92	100—350	0,31	2,67	0,83	1350
380 ₂	То же	—	6,63	6,86	6,74		150—350				
383 ₁	То же, черный мелкозернистый	—	6,68	6,85	6,76	7,30	100—450	0,19	2,70	0,51	1910
			7,65	8,06	7,85		150—480				
384 ₁	То же, бурокрасный с пятнами	—	7,22	7,53	7,33	7,33	150—400	0,50	2,68	1,34	1490
385 ₁	То же, красный, несколько брекчневидный	—	7,25	7,48	7,37	7,37	150—650	0,29	2,69	0,78	1790

Армения

450 ₃	Мраморизованный известняк темносерый афанитовый с белой жилкой	—	6,19	6,88	6,54	6,54	80—393	0,45	2,69	1,21	1210
506 ₁₆	То же, с желтой жилкой	—	6,56	7,54	7,05	7,05	90—400	0,18	2,70	0,49	1740

№ обр.	1	2	3	4			7	8	9	10	11	12
				при нагрузке	при разгрузке	среднее						
		Название породы	Ориентировка давления относит. слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10 ⁻⁵			среднее для породы	Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влажно- насыщение (в вес. %)	Объемный вес	Кажущаяся пористость (в объемн. %)	Временное сопротивле- ние сжатию (в кг/см ²)

Доломиты

496 ₄	Доломит из По- вольска		3,64	4,95	4,29	4,29	80—240	—	—	—	—	—
638 ₁	Доломит подмосков- ный		2,65	2,84	2,72	2,81	140—470	8,93	2,28	20,36	760	—
638 ₂	То же		2,80	3,01	2,90	—	140—490	—	—	—	—	—
684 ₁	Доломит подмосков- ный	—	6,02	6,73	6,37	6,47	300—900	2,23	2,70	6,02	3190	—
684 ₂	То же	—	6,31	6,83	6,57	—	300—1000	—	—	—	—	—

Известняки подмосковные

632	Известняк		1,30	1,30	1,30	1,30	28—143	12,64	2,03	25,66	280	—
817 ₁	То же		1,82	2,05	1,93	1,93	25—100	11,97	2,06	24,6	290	—
817 ₂	»		1,76	1,90	1,83	1,83	25—100	—	—	—	310	—
896 ₁	»		2,24	2,40	2,32	2,32	50—150	10,57	2,12	22,4	—	—
896 ₂	»		2,62	2,72	2,67	2,67	50—150	—	—	—	400	—
660 ₁	»		1,92	2,13	2,02	2,08	100—350	7,32	2,26	16,54	650	—
660 ₂	»		1,99	2,31	2,15	—	150—350	—	—	—	—	—
661 ₁	»		2,61	2,80	2,70	2,63	160—360	7,60	2,27	17,25	720	—
661 ₂	»		2,47	2,65	2,56	—	130—360	—	—	—	—	—
662 ₁	»		2,26	2,46	2,36	—	140—390	—	—	—	—	—
662 ₂	»		2,09	2,26	2,17	2,26	140—370	10,62	2,12	22,51	520	—
879 ₁	»		2,30	2,42	2,36	2,36	50—200	11,09	2,05	22,7	—	—
879 ₂	»		2,26	2,32	2,29	2,29	50—200	—	—	—	—	—
880 ₁	»		3,29	3,45	3,37	3,37	50—300	4,61	2,39	11,0	950	—
880 ₂	»		3,05	3,29	3,17	3,17	50—300	—	—	—	—	—
881 ₁	»		2,28	2,70	2,49	2,49	50—400	3,25	2,50	8,1	—	—
881 ₂	»		3,67	3,89	3,78	3,78	50—400	—	—	—	—	—
882 ₁	»		1,83	2,09	1,96	1,96	50—200	9,19	2,14	19,7	460	—
824 ₁	Известняк пламоу- вый		1,53	1,93	1,73	1,73	50—200	9,88	2,17	21,4	520	—
839 ₁	Известняк органогенно-обломочный		1,78	1,74	1,76	1,76	50—100	15,22	1,97	30,0	210	—
839 ₂	То же		1,43	1,64	1,53	1,53	25—100	—	—	—	200	—
807 ₁	Известняк дистри- тутовый		2,21	2,49	2,35	2,35	50—250	7,93	2,27	18,0	590	—
807 ₂	То же		2,22	2,70	2,46	2,46	100—350	—	—	—	740	—
808 ₁	Известняк		2,48	2,52	2,50	2,50	50—200	11,51	2,04	23,5	430	—
808 ₂	То же		3,05	3,11	3,08	3,08	50—200	—	—	—	460	—
816 ₁	»		2,61	2,72	2,61	2,61	50—200	9,09	2,15	19,5	500	—
816 ₂	»		2,50	2,59	2,45	2,45	50—200	—	—	—	580	—

Таблица 4 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Ориентировка палеонтол. относит. слоистости	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-3}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Принудительное влагонасыщение (в п.с. %)	Объемный п.с.	Капиллярная пористость (в объемн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
899 ₁	Известняк	⊥	3,31	3,47	3,39	3,39	50—350	7,68	2,30	17,7	880
899 ₂	То же		3,11	3,15	3,13	3,13	50—350				—
897 ₁	» »		1,58	1,84	1,71	1,71	50—150	9,52	2,12	20,2	300
898 ₁	» »		1,63	1,87	1,75	1,75	50—150	10,08	2,10	21,2	250
722 ₁	» »		2,33	2,57	2,45	2,45	175—350	10,10	2,12	21,41	—
722 ₂	» »	⊥	2,28	2,38	2,33	2,33	150—400				500
789	» »		2,65	2,75	2,70	2,70	100—350	8,30	2,19	18,26	650
810 ₁	То же, кавернозный		1,37	1,55	1,46	1,46	25—100	9,83	2,14	21,0	340
811 ₁	» » без каверн		3,45	3,76	3,61	3,61	100—250	8,11	2,28	18,5	680
820 ₁	То же		2,09	2,22	2,15	2,15	25—150	11,75	2,05	24,1	380
821 ₁	» »		1,88	1,98	1,93	1,90	25—150	15,08	1,96	29,5	360
821 ₂	» »		1,80	1,94	1,87		25—150				
992 ₁	То же, с желтыми железистыми полосами	—	2,09	2,48	2,28	2,37	100—250	—	2,14	—	640
992 ₂	То же	—	2,18	2,46	2,32		100—250				
893 ₁	То же с черными точечными включениями	—	1,68	1,82	1,75	1,45	50—100	—	1,94	—	260
893 ₂	То же	—	1,06	1,24	1,15		50—100				
628 ₁	Известняк Тульской обл.		4,56	4,79	4,67	4,59	200—650	4,60	2,38	10,95	964
628 ₂	То же		4,19	4,69	4,44						
628 ₃	» »		4,58	4,87	4,72						
628 ₄	» »		4,36	4,71	4,53						
686 ₁	То же, хрупкий		6,25	6,37	6,31	6,38	200—550	1,91	2,56	4,89	1680
686 ₂	То же		6,34	6,58	6,46		200—650				
668 ₁	Известняк Тульской обл.	⊥	4,76	5,01	4,88	5,00	165—410	3,11	2,47	7,68	1460
668 ₂	То же	⊥	4,97	5,28	5,12		180—400				
692	То же, черный стигмариевый	—	6,11	7,36	6,73	6,73	330—460	1,16	2,57	2,98	1220
682 ₁	Известняк толсто-плитчатый Калужской обл.	⊥	6,47	6,62	6,54	6,56	200—650	2,03	2,59	5,26	1875
682 ₂	То же	⊥	6,44	6,72	6,58		250—650				
683 ₁	Известняк серый Калужской обл.	⊥	5,30	5,95	5,62	5,86	300—700	1,85	2,60	4,81	1947
683 ₂	То же	⊥	6,01	6,20	6,10		250—700				
760 ₁	Известняк Владимирской обл.		2,27	2,31	2,29	2,29	25—150	11,34	2,06	23,3	410
760 ₂	То же	⊥	1,92	2,08	2,00		2,00				25—150
857 ₁	Известняк детритусовый Рязанской обл.		1,71	1,79	1,75	1,75	50—100	15,37	1,91	29,3	—
857 ₂	То же	⊥	1,91	1,95	1,93		1,93				50—100

Таблица 4 (окончание)

№ обр.	Название породы	Ориентировка давления относительности	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-3}				Интервал давлений (в кг/см ²)	Правильное влажно- насыщение (в вес. %)	Объемный вес	Капучная пористость (в объемн. %)	Временное сопряже- ние сжатия (в кг/см ²)
			при нагрузке	при разгрузке	среднее	среднее для породы					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
858 ₁	Известняк детриту- совый микрозерни- стый Рязанской обл.		3,35	3,39	3,37	3,37	50—300}	10,02	2,18	21,8	690
858 ₂	То же	⊥	3,58	3,55	3,56	3,56	50—300}				
859 ₁	То же, косослоистый		2,65	2,73	2,69	2,69	25—150}	9,39	2,17	20,4	{ — 340
859 ₂	То же	⊥	2,60	2,74	2,67	2,67	50—150}				
860 ₁	То же, пятнистый .	—	3,21	3,59	3,40	3,40	50—350	4,99	2,42	12,0	940
861 ₁	То же, микрозер- нистый		3,97	4,19	4,08	4,08	100—600}	4,98	2,48	12,3	1360
861 ₂	» »	⊥	3,69	4,01	3,85	3,85	100—600}				
862 ₁	» »		5,07	5,16	5,11	5,11	100—400}	5,32	2,45	13,0	{ — 1040
862 ₂	» »	⊥	5,00	5,04	5,02	5,02	100—400}				
863 ₁	» »		1,80	2,35	2,08	2,08	50—150}	9,32	2,30	21,4	{ — 980
863 ₂	» »	⊥	2,30	2,88	2,59	2,59	100—400}				
864 ₁	» »	—	2,26	2,56	2,41	2,41	50—250	9,29	2,20	20,4	540
894 ₁	Известняк Калини- нской обл.	⊥	2,28	2,88	2,58	2,58	100—200}	6,54	2,36	15,4	{ — 720
894 ₂	То же		2,82	3,14	2,98	2,98	50—200}				
352	Известняк химиче- ский из Поволжья		4,37	4,00	4,19	4,19	100—400	—	2,25	—	720
Эстонская ССР											
725 ₁	Известняк мрамори- зованный серый .	—	5,68	6,26	5,97}	6,11	100—700}	0,27	2,68	0,72	1020
725 ₂	То же	—	5,88	6,64	6,26}		100—700}				
761	» »		4,61	5,76	5,18	5,18	200—500	0,27	2,65	0,72	770
726 ₁	Известняк (доломит) буро-серый	—	4,96	5,35	5,15}	5,21	100—900}	5,12	2,51	12,85	1580
726 ₂	То же	—	4,89	5,64	5,26}		100—900}				
691 ₁	Известняк зеленго- фенгский литограф- ский (Германия)		5,95	6,08	6,01}	5,94	200—650}	1,99	2,56	5,09	—
691 ₂	То же, по данным Берча (Birch, 1942)		5,70	6,05	5,87}		200—600}				
					5,77}	6,02	—	—	2,60	—	—
					6,27}						
Кавказ											
730 ₁	Сланец кровель- ный	⊥	4,86	5,22	5,04	5,04	100—600}	0,13	2,79	0,36	{ 2290 ¹ 1530 ¹ —
730 ₂	То же		11,03	11,27	11,15}	150—550}					
730 ₃	» »		10,40	11,03	10,71}	10,93	250—450}				

¹ Ориентировочное испытание на малых образцах.

Изменение модуля упругости сахаровидных доломитов Поволжья под влиянием многократного насыщения или замораживания

№ обр.	Название породы	Характер предварительной подготовки образцов	Значение E кг/см ² , умноженное на 10^{-4}					Принудительное влагонасыщение (в вес. %)	Объемный вес	Пористость эффективная (в объ.емн. %)	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)
			для сухого образца	после 25 циклов	после 50 циклов	после 100 циклов	после 200 циклов				
411 ₂	Доломит	Замораживание	4,87	4,63	4,15	4,30	4,30	5,70	2,42	13,79	1290
411 ₃	То же	Насыщение	4,57	4,72	4,80	4,40	4,23	—	—	—	—
411 ₄	» »	То же	4,36	—	3,60	4,18	3,53	—	—	—	—
		Среднее	4,53								
412 ₁	То же	Замораживание	5,11	—	4,28	4,16	4,03	5,00	2,50	12,50	1140
412 ₂	» »	То же	5,11	—	—	—	—	—	—	—	—
412 ₃	» »	Насыщение	5,66	5,31	4,48	4,47	—	—	—	—	—
412 ₄	» »	То же	5,06	5,33	5,05	4,76	5,08	—	—	—	—
		Среднее	5,23								
413 ₁	То же	Замораживание	6,01	5,38	5,57	—	5,28	5,10	2,39	12,19	121
413 ₂	» »	То же	5,73	5,75	5,54	5,23	5,33	—	—	—	—
413 ₃	» »	Насыщение	5,44	5,40	—	5,15	5,14	—	—	—	—
413 ₄	» »	То же	5,74	5,35	5,50	—	5,26	—	—	—	—
		Среднее	5,73								
414 ₁	Доломитизированный известняк	Замораживание	4,35	3,79	3,75	3,89	3,68	6,4	2,28	14,59	610
14 ₂	То же	То же	4,30	4,22	3,51	3,77	3,73	—	—	—	—
		Среднее	4,32								
418 ₂	Известковый доломит оолитовой структуры	Замораживание	4,29	Разрушился при испытании			2,75	2,55	7,01	1250	
418 ₃	То же	Насыщение	4,44	4,04	3,48	3,63	3,96	—	—	—	—
418 ₄	» »	То же	4,68	Разрушился при испытании			—	—	—	—	
		Среднее	4,48								
419 ₁	Доломитизированный известняк	Замораживание	3,64	3,49	3,37	—	—	6,33	2,39	15,13	1129
419 ₂	То же	То же	4,30	3,71	3,78	—	—	—	—	—	—
419 ₄	» »	Насыщение	3,77	3,72	3,62	3,70	3,60	—	—	—	—
		Среднее	3,90								

Таблица 5 (продолжение)

№ обр.	Название породы	Характер предварительной подготовки образцов	Значение E кг/см ² умноженное на 10^{-2}				Принудительное влагонасыщение (п. вес. %)	Объемный вес	Пористость, эффективная (в объеми. %)	Временное сопротивление сжатию (п кг/см ²)	
			для сухого образца	после 25 циклов	после 50 циклов	после 100 циклов					после 200 циклов
420 ₁	Доломит	Замораживание	6,56	—	6,14	5,41	5,77	3,07	2,60	7,98	1610
420 ₂	То же	То же	6,36	6,17	5,94	6,85	5,87	—	—	—	—
420 ₃	» »	Насыщение	6,70	6,43	6,74	6,72	6,44	—	—	—	—
		Среднее	6,54								
421 ₁	Доломит	Замораживание	6,15	—	6,17	6,05	—	2,80	2,60	7,28	1770
421 ₄	То же	Насыщение	6,91	6,51	6,15	6,14	—	—	—	—	—
		Среднее	6,53								
422 ₁	Доломит	Замораживание	6,26	5,91	5,69	—	—	3,2	2,59	8,29	1670
		То же	6,20	5,81	5,71	5,11	—	—	—	—	—
		Среднее	6,23								
424 ₂	Известняк брекчиевидный	Замораживание	6,66	—	5,89	5,26	—	0,60	2,63	1,59	1200
		Насыщение	5,38	4,62	4,70	4,55	—	—	—	—	—
		Среднее	6,02								
425 ₂	Доломит	Замораживание	7,46	6,41	6,35	6,21	—	2,52	2,61	6,58	1710
425 ₃	То же	Насыщение	6,50	6,44	6,54	6,45	—	—	—	—	—
425 ₄	» »	То же	7,18	6,83	6,18	6,15	—	—	—	—	—
		Среднее	7,05								
426 ₁	Доломит	Замораживание	5,83	4,98	4,49	3,86	—	1,59	2,67	4,24	1790
426 ₄	То же	Насыщение	4,93	—	4,67	4,65	—	—	—	—	—
		Среднее	5,38								
427 ₁	Известковистый доломит	Замораживание	4,70	4,82	4,66	4,25	—	3,2	2,54	8,13	1360
427 ₄	То же	Насыщение	4,57	4,25	4,09	4,13	—	—	—	—	—
		Среднее	4,64								

Б. В. ЗАЛЕССКИЙ и К. П. ФЛОРЕНСКИЙ

**О НЕКОТОРЫХ ОСНОВНЫХ ПРЕДПОСЫЛКАХ
ИСПЫТАНИЙ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТЬ****ВВЕДЕНИЕ**

Настоящая статья является попыткой обобщения литературного материала и части работ Лаборатории физико-механических испытаний камня Института геологических наук и Института геохимии и аналитической химии имени академика В. И. Вернадского Академии Наук СССР, посвященных вопросам устойчивости пород в условиях наземных сооружений.

Своевременность появления настоящей работы определяется резко возрастающими потребностями в естественном строительном камне для работ по реконструкции Москвы и выполнения других грандиозных по масштабам строек коммунизма. Этим оправдывается постановка авторами некоторых проблемных и дискуссионных вопросов, в решении которых назрела практическая необходимость, но которые не привлекают к себе достаточного внимания со стороны лиц, занимающихся изучением долговечности строительных материалов.

Несмотря на то, что наблюдения, легшие в основу этой работы, проводились в основном на подмосковных карбонатных породах, можно думать, что физические процессы, происходящие при замораживании воды в камне, в общем типичны для широкого круга строительных материалов, и поэтому описываются в общем виде.

При использовании местных и новых строительных материалов, еще недостаточно зарекомендовавших себя с практической стороны, обычно совершенно четко ставится задача выявления необходимых механических свойств камня и очень приблизительно решается его устойчивость во времени в конкретных условиях службы сооружения.

Можно считать бесспорным, что существующие стандарты испытаний камня на долговечность уже давно вызывают сомнение в своей правильности. В то же время проекты новых технических условий принципиально мало отличаются от устаревших, что вызывается отставанием теоретических представлений о механизме разрушения пород от требований величайшего по масштабам строительства.

Морозоустойчивость каменного материала является одним из важнейших условий его долговечности, однако лабораторные испытания морозоустойчивости, хотя и производятся в течение длительного времени, но все же не дают надежных результатов для оценки долговечности камня в сооружении, особенно в разных климатических условиях.

Причину этого следует искать в том, что кажущееся на первый взгляд «простым», морозное выветривание на самом деле принадлежит к весьма сложным явлениям, без учета чего теряют практическую ценность многие лабораторные исследования, направленные к изучению долговечности материала.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ

Разрушение камня от воздействия мороза, вообще говоря, может происходить от двух разных причин. Первая из них — внутренние напряжения, возникающие вследствие разности в коэффициентах объемного расширения слагающих минералов или резкой неоднородности температур в разных слоях камня при его внезапном охлаждении. Разрушения такого типа наблюдаются в пустынных и высокогорных местностях с резко континентальным климатом и высокой степенью солнечного облучения. Подвергаются этому разрушению чаще всего плотные породы, отличающиеся высокой хрупкостью и редко используемые как строительные материалы. В среднеконтинентальном климате этот тип разрушения, если и существует, то может играть лишь весьма подчиненную роль и не останавливает на себе нашего внимания при рассмотрении обычных условий службы камня.

Вторая, значительно более важная причина — разрушающее действие замерзающей воды, находящейся в порах камня.

Можно считать установленным, что в природе «безводных» тел вообще не существует. Вода в той или иной форме входит в виде необходимого компонента во всякую природную систему. Формы нахождения воды в породах весьма разнообразны и резко различаются по своим физическим и химическим проявлениям, изучение которых затрудняется из-за большого количества аномалий в поведении воды как особого природного тела.

Классификация различных типов воды, находящейся в породах, достаточно подробно разработана применительно к почвам, и мы не имеем возможности здесь на ней останавливаться. Следует отметить лишь характерные черты некоторых типов воды, имеющие значение для понимания процесса морозного выветривания.

Вода кристаллогидратов обычно в процессах замораживания не участвует, но может приводить к серьезным разрушениям породы, если кристаллогидрат образует несколько форм с разным содержанием кристаллизационной воды, т. е. форм, обладающих различным молекулярным объемом, точки перехода которых лежат в пределах обычных условий 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 общеизвестно.

Гигроскопическая и пленочная вода покрывает поверхность всех частей камня пленкой от одного до нескольких сот молекулярных слоев, обычно толщиной порядка от $n \cdot 10^{-6}$ до $n \cdot 10^{-4}$ мм. Вода, по видимому, находится в сильно уплотненном состоянии, под давлением в десятки тысяч $\text{кг}/\text{см}^2$, и имеет повышенный удельный вес (1,28—2,45, по разным определениям). Она ведет себя подобно твердому телу, не участвует в обычных процессах замерзания, но создает дополнительный резерв влажности, достигающий до 10% влажности камня. Количество влажности зависит от упругости паров воды в окружающей атмосфере. Такая вода постепенно может переходить в капиллярную. 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 морозного разрушения. Она частично

подчиняется обычным законам действия силы тяжести, медленно перемещается в камне и часто находится в растянутом состоянии, под отрицательным давлением. Капиллярно-связанная вода обычно преобладает над другими типами, ее количество резко меняется в зависимости от условий, в которых находится порода; такая вода может полностью насыщать поры в камне.

При капиллярном подсосе в первую очередь заполняются водой более широкие капилляры вследствие большей скорости движения воды по ним. Но из-за защемления пузырьков воздуха в подмосковных известняках, например, при этом заполняется водой обычно около 50—60% всех пор.

В дальнейшем происходит перераспределение воды таким образом, что мениски ее в капиллярах приобретают одинаковую, наибольшую кривизну, т. е. вода, согласно формуле Томсона, стремится заполнить наиболее узкие поры.

Таким образом, при равной влагоемкости распределение воды по порам может быть резко различно в зависимости от условий водонасыщения.

Температура замерзания воды в капиллярах связана с диаметром капилляра и находится 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. Цытовича (1945, 1947), при повышении отрицательных температур глинистых грунтов 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%, при общей влажности грунта в 44%. Грунты вечной мерзлоты имеют от 19 до 35% незамерзшей воды, несмотря на чрезвычайно длительный период охлаждения.

Весьма показательны опыты Томаса по определению относительного количества воды, переходящего в лед при равных условиях замораживания породы, но с разной степенью насыщения породы водой. Так, при 100% насыщения известняка водой в лед превратилось при -5 ° 99,2% всей воды, а при 10% насыщения — лишь 86,7%. Наиболее вероятное объяснение этого заключается в распределении воды по узким капиллярам при неполном насыщении породы.

На несомненное значение переохлаждения указывают опыты, при которых наблюдается различие между температурами замораживания и таяния льда в порах породы. В черепице вода замерзала через несколько часов при температуре $-5,1$ °, а лед таял при -1 °. Большая часть льда в разных опытах таяла при температуре, лежащей заметно ниже нуля, — возможно, около $-2,5$ °, в то время как для превращения всей воды в лед в плотных черепицах требуется, по данным Томаса (Thomas, 1938), около -10 °, а в известняках — около -6 °.

Мы не будем здесь приводить известных опытов Т. А. Боровик-Романовой, М. И. Сумгина и др. по замораживанию воды в стеклянных капиллярах, тонких пленках и т. д., так как они лишь подтверждают трудность замерзания воды в малых объемах, не вскрывая причин этого явления.

Необходимо, однако, отметить, что температура замерзания воды в порах не остается постоянной в пределах целого цикла многократных замораживаний. Глина с влажностью в 18,4% в опытах Бьюкова при первом охлаждении замерзала при $-1,145$ °, а при четвертом — уже при $-0,620$ °. После перемешивания всей массы температура замерзания опять понижалась до $-1,235$ °.

Лилиенталь указывает, что в трубках, в которых произошла кристаллизация воды, по расплавлению образовавшегося в них льда может возникнуть самопроизвольная кристаллизация, и поэтому такие трубки негодны для получения переохлажденной воды. В черепице, насыщенной до 100% пористости и охлажденной до $-5^{\circ},9$, при первом охлаждении превратилось в лед всего 15,5% воды, а после 25 циклов замораживания и оттаивания, при температуре $-5^{\circ},0$ было обнаружено 92% льда.

В известняке, насыщенном водой до 73% пористости, при первом охлаждении до -5° перешло в лед 57,6%, при третьем $-81,9\%$, а при десятом $-90,2\%$ всей воды (Thomas, 1938).

Для понимания этого явления следует представить себе три процесса, которые одновременно могут протекать в разных случаях и приводить к такому результату:

1. В рыхлых породах (глины) при замерзании происходит значительное нарушение однородной структуры и образование ледяных (водных при оттаивании) прослоек, которые и будут замерзать в дальнейшем значительно быстрее.

2. При неполном насыщении породы водой и образовании льда в широких капиллярах будет происходить перегруппировка воды и сосредоточение ее по широким капиллярам 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 времени оттаивания породы.

3. После таяния льда в воде капилляров при отсутствии конвекции могут некоторое время сохраняться «обломки пространственной решетки» льда, облегчающие последующую кристаллизацию, как это думает Б. П. Вейнберг (1940, стр. 153). Во всяком случае, необходимо считаться с этим явлением и нельзя забывать о нем.

Относительно давлений, которые может производить свободно растущий кристалл льда, существуют разные мнения. Экспериментальные работы по определению давлений свободно растущих кристаллов в водных растворах дают ничтожные величины. А. В. Шубников определяет давление кристалла квасцов в $0,4 \text{ г/см}^2$. И. И. Быков и П. П. Каптерев не наблюдали никакого отклонения двух свободно висящих рядом в воде стальных шариков, обрастающих льдом, т. е. подтверждают ничтожность возникающих давлений.

Теоретическое представление о том, что кристаллизационное давление должно равняться сумме поверхностных натяжений на границах кристалл — жидкость и жидкость — сосуд, также указывает на незначительность возникающих сил.

Нам кажется, что, во всяком случае, давление, вызываемое свободным ростом кристалла, не может быть выше предела упругости его. Для монокристалла льда Б. П. Вейнберг определяет предел упругости в $0,44—0,57 \text{ кг/см}^2$, а для зернистого льда — только $0,09 \text{ кг/см}^2$. Одностороннее давление льда, вследствие его пластичности и текучести, тесно связанных с явлениями режеляции, не может быть высоким (табл. 1). Другие величины известны из опытов Тэбера, который, исходя из силы примерзания льда, допускает давления до 14 кг/см^2 и объясняет их силами направленной кристаллизации; это также лежит достаточно далеко от предела прочности строительных материалов.

При замерзании воды в замкнутой системе могут возникать гидростатические давления совершенно других величин, до 2115 кг/см^2 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 до нескольких сот атмосфер понижается почти прямолинейно, приблизительно на $0,0075^\circ$ на каждую атмосферу. При условии вытекания образующейся воды понижение точки замерзания значительно больше и доходит до $0^\circ,09$ на атмосферу (Финдлей, 1932). Немедленно по снятии давления (например вытекание избытка воды) вода опять замерзает, вследствие чего меняется форма ледяного тела, которое «перетекает» в область пониженных давлений. Это явление известно под названием режеляции (Вейнберг, 1940).

Вода, превращаясь в лед, увеличивается в объеме приблизительно на 9%, и если имеется свободное пространство, куда может выдавливаться образующийся при замерзании излишек объема льда, гидростатического давления не возникает.

Таблица 1

Некоторые физические свойства воды и льда

(по Вейнбергу)

Предел упругости льда монокристалла	0,44—0,57 кг/см ²
Предел упругости льда зернистого	0,09 кг/см ²
Модуль упругости льда E	70—80 т/см ²
Модуль сдвига льда	20—30 т/см ²
Коэффициент Пуассона G	$0,36 \pm 0,13$
Коэффициент объемного расширения	$15,8 \cdot 10^{-5}$
Теплота плавления льда	79,6 кал

Упругость пара переохлажденной воды и льда (в мм)

°C	Вода	Лед
0	4,579	4,579
— 5	3,163	3,013
—10	2,147	1,950

Давление таяния льда

°C	P (в кг/см ²)
—1,93	250
—5,0	609
—10,0	1110

Скорость кристаллизации переохлажденной воды

(в мм/мин.)

По Хартману

°C	Линейная скорость роста кристаллов
—0,5	140
—0,8	200
—1,0	240
—2,0	580
—5,5	1750

Примечание. Понижение температуры таяния при повышении давления на 1 атм. $0^\circ,0075$ — по Бриджмену, $0^\circ,09$ — по Финдлею, при давлении на твердую фазу без жидкой.

В опыте И. И. Быкова и П. П. Каптерева в стеклянный стакан с замерзающей водой помещали воздушный колокол из воронки с запаянным кончиком, куда и выдавливался избыточный объем льда; благодаря этому стакан не трескался при замерзании воды. Совершенно такую же роль амортизаторов давлений играют пузырьки воздуха в порах породы, неполностью насыщенной водою.

Объем этих «запасных резервуаров», необходимых для снятия гидростатического давления при замерзании, и должен быть теоретически не менее 9% от объема воды.

Если мы условимся называть отношение пор, заполненных водою, к общей пористости камня в процентах степенью насыщения его, а степень насыщения, при которой начинает проявляться разрушающее действие воды при замерзании, критической степенью насыщения, то практически критическая степень насыщения для большинства пористых камней приблизительно лежит в пределах 75—80% и в среднем равна 79%.

При равномерном водонасыщении ниже критического суммарный эффект возрастания внутреннего давления в порах породы не проявляется, и общий объем породы с водой и воздухом при замораживании не увеличивается, а даже несколько уменьшается. Это происходит оттого, что здесь преобладает обычное сжатие породы при охлаждении, может быть даже усиленное уменьшением объема льда при температуре ниже точки замерзания, так как температурный коэффициент объемного расширения льда (около $15,8 \cdot 10^{-5}$) значительно выше среднего коэффициента для пород ($18—20 \cdot 10^{-6}$).

При равномерном водонасыщении выше критического как обычная деформация, так и потеря прочности породы резко возрастают (Залесский, Степанов и Флоренский, 1950). По данным Томаса, среднее понижение модуля упругости 10 пористых камней после быстрого замораживания при -6° с насыщением в 80% было 2%, с насыщением 90% — 15% и насыщением в 100% — 42%.

Рассматривая семейство кривых, выражающее зависимость между степенью насыщения породы и потерей прочности при замораживании, описанное нами в предыдущей работе (Залесский, Степанов и Флоренский, 1950), можно видеть, что некоторые кривые почти прямолинейные, другие же имеют более или менее ясно выраженный изгиб. Можно предполагать, что теоретически истинная зависимость выражается кривой, приближающейся по форме к вытянутой букве S или изображению значка интеграла. Во всяком случае, совершенно очевидно, что сравнение истинной морозостойкости двух пород возможно только при равных (или приведенных) условиях водонасыщения.

Формула приведенной морозостойкости, которой мы пользовались в предыдущих работах

$$\text{Приведенная степень разрушения} = \frac{\text{Степень разрушения} \times 100}{\text{Степень насыщения}},$$

безусловно, имеет лишь очень грубо приближенный характер, но, тем не менее, позволяет уже выявить некоторые закономерности, которые совершенно ускользают при обычном сравнении морозостойкости без учета степени насыщения.

Практическая степень насыщения подмосковных известняков, достигаемая при стандартных методах испытания, приближается к степени насыщения их при капиллярном подсосе и обычно колеблется в пределах 50—70%. Рациональной методикой насыщения пород вакуумом удается повысить ее до 97—100%, но такое насыщение достигается лишь с трудом и, надо думать, редко наблюдается в наземных постройках.

Однако при неполном насыщении всего камня сравнительно легко возникает насыщение поверхностной его зоны, превышающее критическое.

Как указывалось выше, вода, попавшая в камень, не остается там неподвижной, а продолжает мигрировать в теле камня в зависимости от внешних условий.

Процесс миграции воды к охлажденной поверхности, как показано нами (Залесский, Степанов и Флоренский, 1950), протекает достаточно быстро и может давать водонасыщение отдельных зон, значительно превышающее критическое. Один образец известняка после одностороннего охлаждения в течение трех суток вместо средней исходной степени насыщения в 78,4% дал степень насыщения охлаждаемого конца в 93,4% при соответствующем насыщении утепленного конца в 48,4%. При этом часть льда может свободно выделяться на поверхности образца и при проведении многократных циклов замораживания — оттаивания постоянно образовывать резерв влаги, приводящий к дальнейшему насыщению поверхностных частей охлаждаемой стороны камня. Такие же результаты для рыхлых пород были получены, например, И. И. Быковым и П. П. Каптеревым и некоторыми другими исследователями и не вызывают сомнений.

Таким образом, в процессе многократного замораживания образцов не насыщенного водой камня мы фактически имеем не постоянную степень насыщения образцов, которая может контролироваться и весовым методом, а постепенное возрастание степени насыщения наружных частей образца. Это приводит к полной неравноценности разных циклов замораживания, ведущихся фактически при различных условиях.

Циклы оттаивания не вызывают полного восстановления первоначального распределения влажности, так как процесс миграции воды при этом носит совершенно иной характер. Ясно, что длительность замораживания образцов и их оттаивания может внести существенные поправки в характер распределения воды в породе. Фактическая степень насыщения поверхностной зоны камня в сооружении и мощность насыщающейся зоны будут, следовательно, зависеть:

- 1) от общего запаса капиллярной воды в теле камня (даже при малой влажности) и скорости пополнения его;
- 2) от равновесия между процессом миграции воды к охлаждаемой стороне камня и испарением воды, или сублимацией, с поверхности;
- 3) от числа циклов замораживания — оттаивания, относительной длительности этих периодов и температурных условий их.

При этом, если скорость конденсации воды превысит скорость испарения, на некоторой глубине от поверхности будет создаваться более или менее тонкий слой камня, насыщенный водой до высокой степени, которая не ограничивается капиллярным насыщением. Вероятно, аналогичные условия мы имеем в вечномерзлых грунтах, где часто создается даже значительное пересыщение почвы льдом, так как частицы грунта могут перемещаться и объем образующегося льда не ограничен первоначальной пористостью породы.

При рассмотрении процесса замораживания во времени становится ясным, что он, начинаясь от охлаждаемой поверхности камня, постепенно передвигается внутрь его. Таким образом, 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 такого же выдавливания избыточного объема льда на поверхность образца и внутрь его, по направлениям наименьшего сопротивления.

При температуре, весьма близкой к нулю, и достаточном времени вследствие явлений режеляции и пластичности льда потребуются 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 уравнивания возникающих давлений, возрастают очень резко.

Если процесс замерзания воды в порах происходит при достаточном переохлаждении или просто с большой скоростью, то возникающие при этом напряжения могут легко превысить предел прочности вещества камня и вызвать его разрушение.

Наблюдая, например, в dilatометре за изменением объема водонасыщенной породы в процессе охлаждения, можно видеть резкое увеличение ее объема в момент фазового перехода воды, т. е. замерзания воды в порах породы, с постепенным уменьшением общего объема при дальнейшем охлаждении. Острота и высота максимума объема, который приурочен ко времени замерзания воды, зависит от скорости перехода образца через точку замерзания. Дальнейшее охлаждение породы после перехода всей воды в лед даже 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 сначала объем образца резко увеличивается, соответственно переходу части воды в лед, а затем постепенно уменьшается вследствие перегруппировки воды и льда. Характерно, что скорость «усадки» больше при -1° , чем при -5° , а абсолютная величина ее увеличивается с понижением температуры. В песчаниках величина усадки достигает 0,02%.

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

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

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

Таким образом, возникающее в камне при замораживании разрушающее напряжение зависит от соотношения между скоростью образования льда в нем и легкостью «рассасывания» возникающих при этом местных давлений. При этом нижним пределом давлений может быть давление свободно растущего кристалла льда (около $0,5 \text{ кг/см}^2$), а верхним — давление воды, замерзающей в замкнутой системе (до 2000 кг/см^2 при температуре -22°).

Практически наблюдаемые средние давления в известняках, песчаниках и аналогичных по пористости рыхлых породах определяются разными авторами в пределах от 0,6 до 23 кг/см^2 , что недостаточно для разрушения большинства пород. Это, вероятно, указывает на наличие местных давлений в отдельных порах камня, весьма значительно превышающих средние давления, определяемые по средней деформации камня в процессе замораживания.

Совершенно 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 опыт, при котором модуль упругости камня после двукратного замораживания со скоростью 3° в час понизился на 39%, при покраске его масляной краской — на 60% и при пропитывании воском до половины образца — на 63%. При этом часть воды вытесняется из образца с незащищенной стороны, но вблизи поверхности раздела с пропитанной частью наблюдаются усиленные разрушения.

К таким же результатам приводит всякое уплотнение наружной поверхности камня в условиях сооружения (пропитка, покраска, корочки выветривания), мешающее свободному испарению и выветриванию льда за счет конденсации из глубины тела камня. Исключением может являться только такое 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.

Учитывая вышеизложенное, можно видеть, с каким сложным комплексом явлений приходится иметь дело при изучении морозоустойчивости даже одной породы в разных условиях замораживания.

Вопрос еще более усложняется при сравнении морозоустойчивости пород разных структурных типов.

Возможно, что наиболее объективным методом определения морозоустойчивости явилось бы изучение дифференциальной пористости камня, т. е. изучение структуры порового пространства породы, которое и является ареной протекающих процессов кристаллизации воды.

Однако такое изучение сопряжено с некоторыми методическими трудностями и пока еще не может быть широко использовано в практике.

По своему отношению к кристаллизации воды поры в исследованных породах могут быть разделены на пять групп:

1. Очень узкие поры, в которых действуют главным образом адсорбционные силы и вода которых не участвует в обычных процессах замерзания (r от $n \cdot 10^{-7}$ до $n \cdot 10^{-4}$ мм).

2. Поры капиллярных размеров, которые могут заполняться водой в условиях испытаний или службы камня и вода которых замерзает (r от $n \cdot 10^{-4}$ до $n \cdot 10^{-1}$ мм).

3. Весьма крупные поры, которые не заполняются водой в условиях службы камня и которые оказывают скорее благоприятное воздействие на морозоустойчивость, например, поры известняка-ракушечника ($r > n$ мм).

4. Поры, совершенно недоступные для проникновения воды в них, как, например, замкнутые поры некоторых туфов.

5. Промежуточный тип капиллярных пор, которые можно назвать полузамкнутыми и которые резко меняют свою роль в разных условиях водонасыщения и службы камня. До тех пор, пока в них не проникла вода, они могут оказывать благоприятное воздействие на устойчивость камня как компенсаторы давлений. Но если они все же окажутся заполненными водой в процессе многократной миграции воды в камне, то вода замерзает в них в условиях, близких к условиям замкнутой системы, и может давать очень высокие внутренние давления.

Как нам кажется, именно в этом явлении заключается разрушающее действие так называемой «горной» или «карьерной» влажности, которое отмечается для многих строительных камней. Судя по известным нам анализам, горная влажность не обладает особо специфическим составом, а связана с составом подземных или грунтовых вод; ее характерной особенностью является связь с полузамкнутыми порами, заполняющимися с большим трудом. Однако нет никаких данных, позволяющих утверждать невозможность такого заполнения в условиях обычной службы камня в течение длительных промежутков времени.

Поры капиллярных размеров, обычно колеблющихся от десятитысячных до целых миллиметров, т. е. охватывающих собою почти пять порядков, также различно влияют на морозоустойчивость породы. По нашим данным (Залесский, Степанов и Флоренский, 1950), морозоустойчивость известняков падает по мере развития узких пор, не наблюдаемых в микроскоп, которые мы называем ультрамикрорами или ультрапорами и которые, повидимому, имеют диаметр $n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-3}$ мм.

Некоторые исследователи принимают верхнюю границу размеров ультрапор в 0,005 мм, впрочем, — без особых оснований.

Истинная физическая сущность явления не вполне ясна для нас, и мы воздерживаемся от высказывания преждевременных суждений, но особая роль ультрапор в процессах замораживания подтверждается и другими исследователями. Например, в то время как общая пористость известняка после 60 циклов замораживания увеличилась с 27 до 44%, т. е. в 1,65 раза, его ультрапористость уменьшилась от 14% в 1,55 раза. Все повышение пористости оказалось за счет увеличения количества обычных пор в 2,1 раза.

По нашим наблюдениям над известняками старинных зданий, их пористость в процессе службы возрастает за счет пор, различных под микроскопом.

Возможно, что для морозоустойчивости решающее значение имеют не ультрапоры сами по себе, а одновременное присутствие капиллярных пор, резко различных по своим размерам. Надо полагать, что наиболее морозоустойчивые структуры должны характеризоваться изометричными (равновеликими) порами, свободно соединяющимися друг с другом по типу сетки пересекающихся капилляров.

По Гиршвальду, теоретическая морозоустойчивость камня зависит от коэффициента насыщения породы и коэффициента размокания ее.

Мы считаем, что определенные по его методике коэффициенты имеют чисто эмпирический смысл; они не вскрывают истинной физической сущности процесса, так как условия их определения носят произвольный характер. Как показали работы Лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород Института геологических наук Академии Наук СССР (Залесский, Корсунский и Ланин, 1941), и насыщение, и размокание пород протекает очень своеобразно и не заканчивается в течение весьма длительных промежутков времени. Тем не менее, для портландских известняков установлено, что коэффициент насыщения является прямолинейной функцией ультрапористости. Неморозостойкие глинистые и пелитоморфные известняки, имеющие высокий коэффициент размокания, должны иметь и повышенное количество ультрапор.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Рассмотрение, даже в общих чертах, поведения воды в процессе замораживания камня ясно показывает, что для получения вполне сравнимых результатов испытаний на морозоустойчивость нужно очень строго выдерживать постоянство условий испытания. Решающими факторами при этом являются степень насыщения породы водой и скорость процесса замораживания. Степень насыщения породы нельзя контролировать только весовым методом в связи с особенностями распределения воды внутри образца, которые в данной породе зависят как от условий насыщения ее, так и от условий проведения замораживания и оттаивания.

По существующей методике водонасыщения, степень насыщения породы получается близкой к степени насыщения при капиллярном подсосе, но она в процессе проведения испытаний может меняться в отдельных зонах камня и достигать в них 100%.

В результате даже при постоянных условиях температуры замораживания мы имеем фактически неопределенную степень насыщения и различную скорость промораживания вследствие значительно меняющейся (в зависимости от влажности) теплопроводности породы.

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

Создающуюся неопределенность условий пытаются выравнять проведением большого количества циклов замораживания, затрачивая на это очень длительное время.

Испытания, проведенные в различных лабораториях, дают плохо согласующиеся результаты вследствие даже незначительных изменений в условиях опытов. Число циклов испытания не имеет под собой серьезного основания, и их подбирают таким образом, чтобы можно было оценить разрушение породы наиболее грубыми методами наблюдения. Скорость охлаждения не оговаривают и в ряде случаев при испытаниях не поддерживают одинаковой, так как конечная температура образцов устанавливается в зависимости от объема холодильного шкафа, его мощности и некоторых других причин.

Вынося на широкое обсуждение создание рациональных методов испытания морозостойкости породы, мы считаем возможным высказать следующие положения, которые вытекают из проведенной нами работы:

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, достигнутое методом капиллярного насыщения, будет резко изменено в процессе многократных циклов замораживания, а степень насыщения отдельных зон камня может измениться даже вдвое, т. е. на 100%.

Поэтому при испытаниях целесообразно добиваться полного насыщения пористости камня, что создаст определенность условий испытания и приблизит его к вероятным условиям водонасыщенности отдельных зон. Как показали наши работы, водонасыщение камня под вакуумом удается довести практически достаточно быстро до 97—100% капиллярной пористости. Относительная ошибка степени насыщения при этом падает до 2—3%. При этом насыщение может сохраняться равномерным до конца испытания, и в него включаются все группы пор, могущие заполняться водой и удерживать ее капиллярными силами.

2. Как метод оценки происходящих при замораживании нарушений структуры образца следует принять падение упругих свойств камня. Это позволит сгладить влияние возможных неоднородностей породы на результаты испытания и следить за устойчивостью камня с первого цикла замораживания, не подвергая его разрушению. При этом мы исходим из того, что если замораживание разрушает камень, то, применяя достаточно тонкие методы наблюдения, можно уловить разрушение в самых начальных стадиях его. Характер возрастания кривых падения прочности с увеличением числа циклов замораживания должен определяться начальным наклоном типичных кривых. Разрушения до некоторой степени носят аддитивный характер.

Создание таких типовых кривых для разных пород — очень большая работа, которая должна производиться в лабораториях, занимающихся исследованием строительных материалов. Типовые кривые позволят резко снизить число циклов испытания, необходимое для оценки морозоустойчивости породы.

Наблюдения некоторых авторов, указывающие на то, что кривые, которые выражают зависимость падения прочности образца от числа цик-

лов замораживания, имеют переломы то в одну, то в другую сторону, подтверждают наши представления о фактической неравномерности условий замораживания.

Нам представляется вероятным, что наиболее целесообразным испытанием падения прочности является определение модуля упругости на изгиб.

3. Температура испытания на замораживание не имеет решающего значения; повидимому, практически она может быть выбрана в пределах $-10-15^{\circ}$, так как должна обеспечить полное замораживание воды в камне при охлаждении с заданной скоростью. Следует обязательно оговорить скорость охлаждения образцов и равномерность его. Если считать, что скорость охлаждения является постоянной в зависимости от температуры воздуха в холодильном шкафу, то необходимо выработать соотношение между мощностью шкафа и допускаемой его загрузкой, обеспечивающее равную фактическую скорость охлаждения образцов во всех лабораториях.

Следует продумать взаимное расположение образцов, обеспечивающее равномерность их охлаждения со всех сторон. Мы считаем, что при строгом соблюдении условий испытания возможно создание переходных коэффициентов для сопоставления лабораторных условий охлаждения, идущих обычно со скоростью $3-7^{\circ}$ в час, с природными условиями замораживания в разном климате со скоростью $0,5-3^{\circ}$ в час. Для разных основных типов структур камня эти коэффициенты, вероятно, будут различны. Возможно, что целесообразнее сразу приблизить лабораторные условия скорости замораживания к природным.

4. Морозоустойчивость породы, определенную в таких условиях, можно назвать структурной морозоустойчивостью породы и тесно связать и с микроскопической, и с физической структурой камня.

5. Фактическая морозоустойчивость камня в сооружении зависит от его структурной устойчивости и зональной степени насыщенности, достигаемой в конкретных условиях службы камня. Для выяснения последнего вопроса необходимо немедленно провести широкие обследования влажности разных сооружений по возможно более тонким зонам в глубину стен, на разной высоте от земли. Основное влияние климатических условий скажется в степени вероятности возникновения насыщенной зоны, в скорости, с которой осуществляется переход всей воды в камне через точку замораживания, и, конечно, в числе таких переходов.

ЛИТЕРАТУРА

- Вейнберг Б. П. Лед. М.—Л., 1940.
- Залесский Б. В., Корсунский А. И. и Лапин В. В. О долговечности некоторых разновидностей карбонатных пород Самарской луки. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1941, вып. 58, сер. петрограф., № 19.
- Залесский Б. В., Степанов В. Я. и Флоренский К. П. Опыт изучения физических свойств известняков мячковского горизонта. 1. Мячковская группа месторождений. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1950, вып. 121, петрограф. сер., № 36. 2. Песковская группа месторождений. Там же, вып. 122, сер. петрограф., № 37.
- Финдлей А. Правило фаз и его применение. ГНТИ, 1932.
- Цытович Н. А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геол., 1945, № 5-6.
- Цытович Н. А. О незамерзающей воде в рыхлых горных породах. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геол., 1947, № 3.
- [Шубников А. В.] Schubnikoff A. V. Vorläufige Mitteilung über die Messung der sogenannten Kristallisationskraft. (Предварительное сообщение о методике измерения так называемой кристаллизационной силы). Zs. Krist., 1934, Abt. A., 88.
- Thomas W. N. Experiments on the freezing of certain building materials. Build. Research Techn. Paper, 1938, 17.

В. В. ЛАПИН И Г. С. БУРЛЯКОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ШЛАКОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА)

ВВЕДЕНИЕ

Топливные шлаки, ввиду их широкого распространения и дешевизны, представляют особый интерес для использования при изготовлении местных строительных материалов, например, как заполнителей в бетонах и растворах, для шлакобетона, получаемого методом «пробуждения», и пр.

В соответствии с видами углей выделяют четыре типа топливных шлаков: а) буроугольные, б) каменноугольные, в) антрацитовые и г) смешанные, возникшие за счет сгорания смеси бурого угля и антрацита, бурого и каменного угля и т. п.

Минералогия и микроструктуры специальной разновидности топливных шлаков от сжигания горючих сланцев (сланцевозольные шлаки) были уже описаны Д. С. Белянкиным и В. В. Лапиным (1945), и здесь мы их не рассматриваем.

Обычно структура рыхлых топливных шлаков очень неоднородна. Эти шлаки состоят из частиц разной формы и размера — от пыли и до кусков в 4—5 см и крупнее. Вещественный состав этих частиц также очень различен.

Сложность и разнообразие состава и структуры топливных шлаков связаны с различием в составе углей и сопутствующих им минеральных частей топлива, а также с различием температурных условий сжигания угля, зависящих от конструкции топочных агрегатов, и т. п.

Минералогический состав и структуры рыхлых топливных шлаков, обусловленные характером исходного топлива и физико-химическими процессами, протекающими при сжигании разных углей, изучены еще весьма недостаточно.

Макроскопический, а затем и микроскопический просмотр многих образцов очень неоднородных рыхлых топливных шлаков от сжигания бурых, каменных и антрацитовых углей, а также смешанных углей, позволил нам выявить в них ряд более или менее однородных составляющих. В число их входят: 1) частички неполностью сгоревшего угля (бурого, каменного или антрацита); 2) частички слабообожженной глинистой породы; 3) частично обожженные кусочки глинисто-сланцевой породы; 4) кусочки кварцево-глинистой породы, в той или иной мере подвергшиеся

обжигу; 5) частички углисто-глинистой породы: а) неслоистой и б) сланцеватой; 6) кусочки глинисто-железистой породы, подвергшиеся в той или иной степени обжигу; 7) частички кокса; 8) сплавленные кусочки, называемые здесь «собственно шлаком».

Химический состав всех этих однородных составляющих топливных шлаков приводится в табл. 1. Все компоненты (за исключением SO_2) определены в остатках после потери при прокаливании.

Таблица 1

Химический состав (в % на прокаленное вещество) выделенных из рыхлых топливных шлаков составляющих их однородных разновидностей

Анализы В. С. Беджагия

Наименование составляющих шлака	SiO_2	R_2O_2	CaO	MgO	SO_2	S	Сумма	Потеря при прокаливании	Примечание
Уголь бурый, полностью сгоревший	54,97	41,42	1,89	0,44	0,58	—	99,30	48,07	Качественно обнаружены следы Na_2O
Слабообожженная глинистая порода	51,23	46,92	1,04	0,44	0,13	—	99,76	2,60	То же
Глинисто-слюдистая порода	54,41	40,33	0,82	1,26	0,40	—	97,22	4,97	Качественно обнаружена Na_2O
Кварцево-глинистая порода	86,40	10,32	0,78	0,23	0,12	—	97,85	2,55	То же
Углисто-глинистая (не слоистая) порода	54,01	43,95	0,22	0,76	0,65	—	99,59	18,43	То же
Углисто-глинистая (сланцеватая порода)	58,32	36,87	0,71	1,62	0,65	—	98,17	10,53	То же
Глинисто-железистая порода	1,77	94,26	0,37	1,16	0,22	27,30	125,08	29,41	То же, SO_2 определено после потери при прокаливании
Кокс	34,24	54,60	5,18	3,34	3,37	—	100,73	77,87	То же и сульфидная сера
Собственно шлак бурых углей	48,66	46,60	3,17	0,78	0,18	—	99,39	1,03	То же
Собственно шлак антрацита	55,45	35,91	1,77	1,70	0,32	—	95,15	3,85	То же

Чтобы понять поведение таких сильно неоднородных топливных шлаков при практическом их использовании для получения строительных материалов, необходимо знать: 1) химико-минералогический состав, структуру и свойства отдельных слагающих шлак однородных его разновидностей и 2) количественное соотношение в данном шлаке этих однородных составляющих.

В настоящей статье мы приводим результаты подобного исследования шлаков, полученных при сжигании бурого угля, антрацита и смешанных

углей. В качестве последней разновидности мы изучили паровозные шлаки Московского железнодорожного узла, получаемые от сжигания смеси бурых углей и антрацита или бурых и каменных углей.

ШЛАКИ ОТ СЖИГАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ

Эти шлаки наименее изучены из всех разновидностей топливных шлаков, так как более или менее широкое использование буроугольных шлаков началось в последние годы. Этому способствовал неуклонный рост добычи угля в Подмосковном бассейне. Сильно развитая промышленность Московской обл. дает в качестве отходов очень большое количество топливных шлаков, в составе которых содержание буроугольного шлака значительно. Рост промышленности Центрального промышленного района и необходимость сокращения перевозок угля из дальних районов обуславливают повышение роли местного топлива, а отсюда и дальнейший рост количества буроугольных шлаков. В связи с этим интерес к их практическому использованию должен возрастать. Это требует, в свою очередь, более тщательного изучения состава и свойств буроугольных шлаков.

Бурые угли относятся к малокалорийным, и их теплотворной способности обычно недостаточно для сплавления и даже спекания минеральных примесей в однородную массу.

Зональная неравномерность теплового режима в топке также способствует слабому спеканию части более тугоплавких минеральных составляющих топлива. В качестве примесей в подмосковных углях возможны различные глины (среди них — углистая глина, глина серая, песчаная, глина серая «синика» и др.), углистые сланцы, песок, колчедан, гипс.

В результате выгорания (обычно неполного) органики из топлива и частичного спекания или оплавления примесей к углю образуется рыхлый, неоднородный буроугольный шлак с большим содержанием более тонкозернистой зольной части.

Шлак подмосковного бурого угля был нами рассортирован по внешнему виду на 6 составляющих его разновидностей, изученных затем под микроскопом. Процентное содержание этих составляющих в трех различных по гранулометрии фракциях шлака¹ представлено в табл. 2.

Составляющая «с о б с т в е н н о ш л а к» в изученном нами шлаке представлена ошлакованными пористыми кусочками темносерого и бурого цвета с включением участков кварцево-глинистой и углисто-глинистой сланцеватой черной или более светлой малоизмененной породы.

По микроструктуре эти кусочки неоднородны (фиг. 1 и 2). Имеются участки слабоизмененной кварцево-глинистой и кварцево-углисто-глинистой породы, а наряду с ними — участки сильно ошлакованной глинистой породы из стекла и войлока муллита с присутствием также магнетита. Встречен большой (до 4 мм в поперечнике) участок из оплавленных зерен кварца; между ними располагается стекло с кристаллизацией кристобалита и магнетита. На контакте этого участка с оплавленной глинистой породой в стекле развиваются крупные иголки муллита.

Среди ошлакованной породы встречаются участки стекла с кристаллизацией анортита и участки, обогащенные магнетитом.

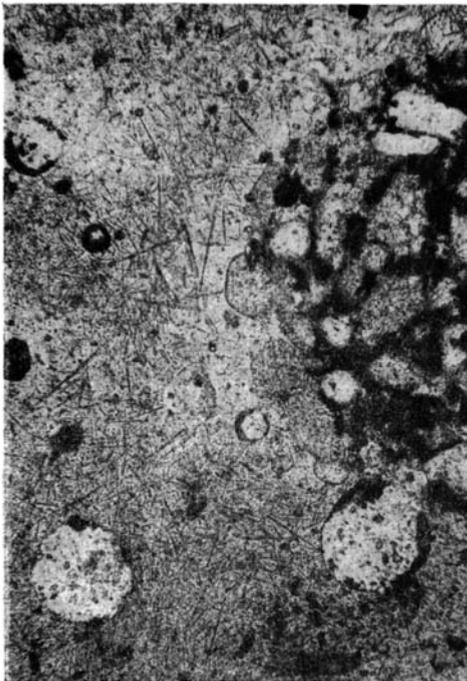
Пример химического состава разновидности «собственно шлака» бурых углей приведен в табл. 1.

Кусочки «собственно шлака» являются продуктом наибольшего изменения сопутствующих углю пород и минералов. В противоположность этой составляющей шлака, наименее измененной частью топлива являются

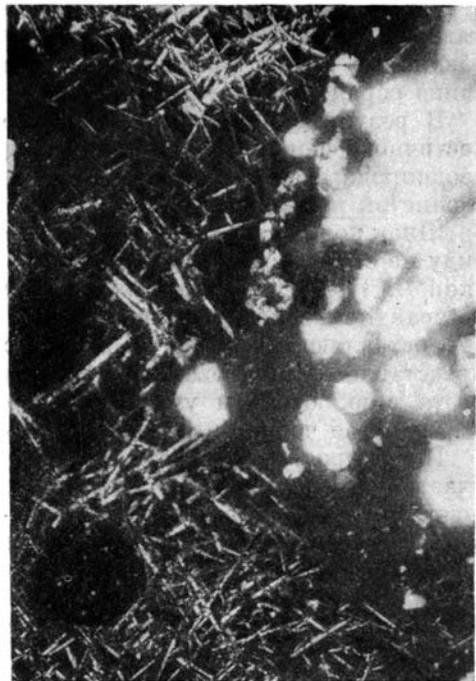
¹ Фракции с размером зерен мельче 5 мм и крупнее 40 мм нами не изучались.

Содержание разных составляющих в трех фракциях шлака бурых углей (в %)

№ п/п.	Наименование составляющих шлака	Содержание по фракциям			Среднее для трех фракций
		5—10 мм	10—20 мм	20—40 мм	
1	Собственно шлак	22,4	21,8	59,7	34,6
2	Уголь, непольностью сгоревший	11,0	21,9	19,3	17,4
3	Глинистая слабообожженная порода	59,5	51,3	14,3	41,7
4	Глинисто-слюдистая порода	2,7	0,3	0,2	1,1
5	Углисто-глинистая (неслонистая) порода	0,3	0,2	0,8	0,4
6	Глинисто-железистая порода	3,8	2,6	3,2	3,2



Фиг. 1. Контакт темного из-за присутствия органики участка с белыми зернами кварца, с участком стекла с иглочками муллита. Без анализатора, $\times 76$

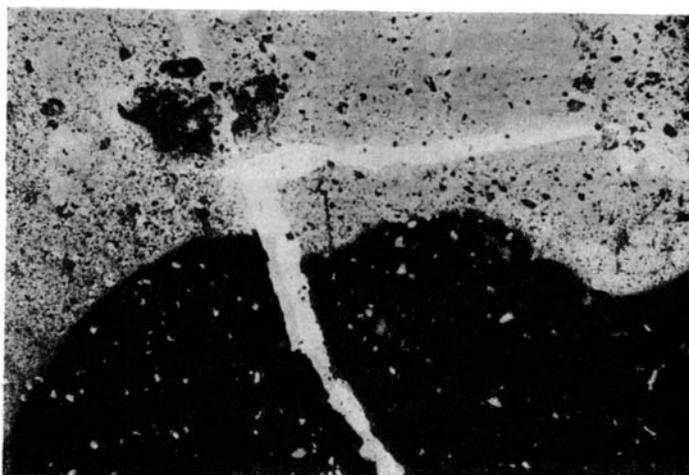


Фиг. 2. То же, что на фиг. 1, но с анализатором, $\times 76$

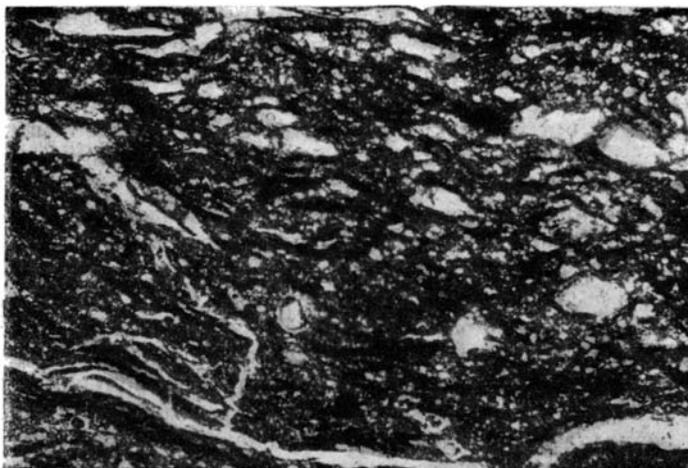
кусочки углистой породы с непольностью выгоревшей органикой, особенно в центральных частях кусочков. По внешнему виду это вещество черного цвета, по периферии обесцвеченное до светлосерого

цвета; признаки ошлакования отсутствуют. В некоторых кусочках хорошо выражена сланцеватость и остроуголовая внешняя их форма.

В прозрачных шлифах, изготовленных из подобных кусочков, видна черная непрозрачная масса с включением угловатых зернышек кварца и редких мелких прозрачных участочков глинистого вещества (фиг. 3).



Фиг. 3. Контакт черного участка невыгоревшей органики обесцвеченным участком выгоревшей органики. Без анализатора, $\times 20$



Фиг. 4. Микроструктура слабообожженной глинистой разновидности с трещинками и порами. Без анализатора, $\times 20$

Эта черная масса с преобладанием углистого вещества переходит в светлую прозрачную, крайне тонкозернистую глинистую породу, содержащую значительное количество угловатых зерен кварца и черные зерна углистого вещества неправильной формы. Переход от черного к обесцвеченному участку в шлифе не резкий. Распределение зерен кварца в образце неравномерное.

Пример химического состава подобной разновидности шлака представлен в табл. 1. Как видим, 48,07% приходится на невыгоревшую органику.

В минеральной составляющей этого шлака кремнекислота частично представлена кварцем, частично входит в продукт изменения глинистого вещества, а остаток — в стекло; в состав последнего входят также CaO, MgO, щелочи (не определялись) и часть Al_2O_3 . Из полуторных окислов небольшая часть приходится на окислы железа (магнетит). Очень немного CaO, Al_2O_3 и SiO_2 падает на анортит.

Следующая разновидность — кусочки слабообожженной глинистой породы (фиг. 4). Обычно эти кусочки светлого и буровато-серого, а внутри иногда черного (невыгоревшая органика) цвета, со следами сланцеватости и без угловатых очертаний. На некоторых кусочках заметны следы ошлакования.

Под микроскопом эта разновидность сильно пористая. Поры неправильной, нередко удлинённой формы. Часты извилистые, примерно параллельные друг другу, трещины.

Масса образца состоит из изотропного вещества или бесцветного, или темного, почти непрозрачного. Это вещество представляет собою слабоизмененную обжигом глинистую породу с не вполне выгоревшей органикой. Кварц отсутствует.

Ошлакованные участки таких кусочков шлака неоднородны и состоят из пористого буроватого, местами почти черного стекла, обогащенного то муллитом, то магнетитом, а иногда без следов кристаллизации; в стекле встречается много оплавленных зерен кварца.

Химический анализ такой составляющей шлака приведен в табл. 1. Из него следует, что в образце на долю воды и несгоревшей органики приходится 2,60%, а остальное падает в основном на обезвоженное глинистое вещество и кварц.

Частичное остекловывание кусков этой разновидности чаще встречается в шлаках смешанных углей, чем в бурых подмосковных. Цвет этой составляющей колеблется, как указано, от светло- до темнобурого. Присутствие ее в шлаке в значительной мере определяет его цвет (например, розово-красный цвет подмосковных углей, долго пролежавших в отвале). В шлаках смешанных углей этой составляющей много, и они светлее, чем подмосковные, темный цвет которых обусловлен значительным содержанием не вполне сгоревшего угля.

В изломе некоторых кусочков этой составляющей (слабообожженная глинистая порода) видна явная зональность: центральная темная, почти черная зона, содержащая, наряду с обожженной глиной, также невыгоревшую органику, и периферическая обесцвеченная часть, покрытая снаружи более крепкой, но не спекшейся корочкой. Ввиду значительной влагоемкости подобных кусочков глины, содержащей углистое вещество, центральные их части при увлажнении поглощают значительно больше воды, чем их периферические, уже не содержащие углистого вещества и более крепкие корочки. В результате неравномерное изменение объема приводит к разрушению таких кусочков, поэтому использование их в качестве, например, заполнителя для бетона крайне нежелательно.

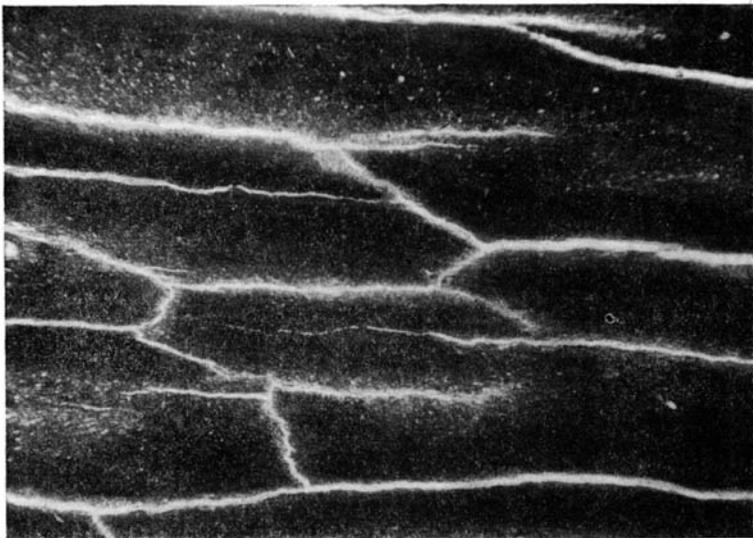
Следующая, глинисто-слюдистая составляющая бурого угольного шлака макроскопически представляет собой плотные кусочки слабоизмененной сланцеватой породы от темносерого до черного цвета. Некоторые кусочки сохранили остроугольные очертания.

По микроструктуре (фиг. 5 и 6) это слоистая глинисто-слюдистая порода со слоями, обогащенными то глинистым веществом, то слюдой, то, наконец, черным органическим веществом. В небольшом количестве различаются мелкие зернышки кварца. Явных признаков изменения породы при обжиге не наблюдается.

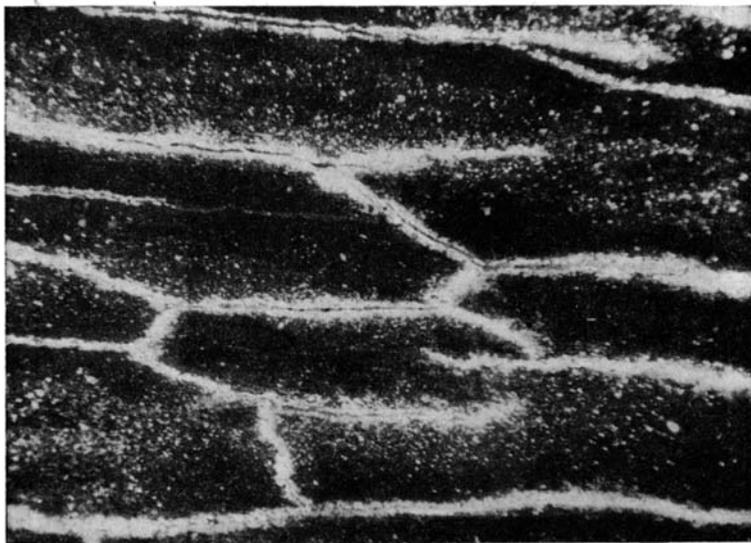
Химический состав подобной составляющей представлен в табл. 1. Судя по сумме анализа, в образце содержится несколько повышенное

количество щелочей (не определялись), что согласуется с содержанием в ней слюды и, возможно, гидрослюдистого минерала.

Углисто-глинистая составляющая бурогоугольного шлага отличается от только что описанной разновидности значительно бoльшим содержанием органики (18,43% потери при прокаливании). Химический состав минеральной части близок к таковому глинисто-слюдистой разновидности,



Фиг. 5. Микроструктура глинисто-слюдистой слоистой породы с чередованием слоев, обогащенных то черной органикой, то глинистым веществом, то слюдыстым минералом. Без анализатора, $\times 30$



Фиг. 6. То же, что на фиг. 5, но с анализатором, $\times 30$

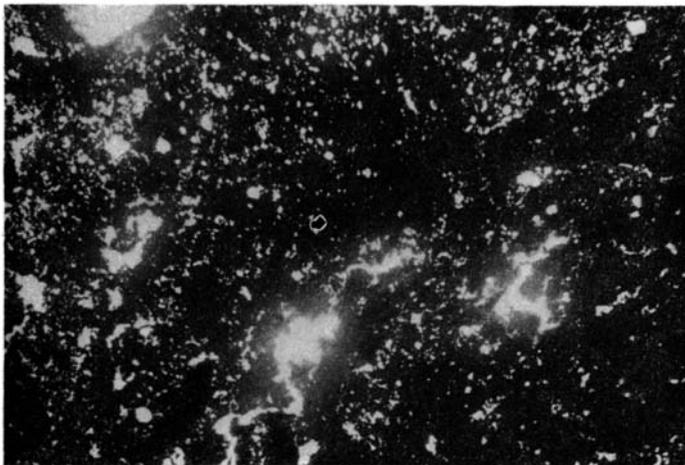
но, судя по сумме анализа, здесь меньше щелочей, что согласуется с минералогией (меньшее содержание слюды в углисто-глинистой составляющей).

По внешнему виду эта составляющая сходна с неполностью сгоревшим

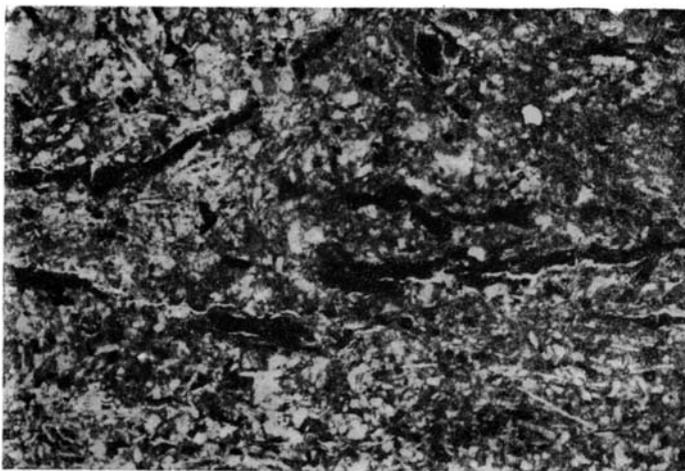
углем (см. вторую из описанных выше разновидностей): кусочки черной углистой породы, по периферии обесцвеченные до светлосерого цвета.

Шлиф, приготовленный из более светлого кусочка, представляет кварцево-слюдисто-глинистую породу с извилистыми прожилками в ней темного органического вещества (фиг. 7).

Этой разновидности, встречающейся в незначительных количествах только в шлаках бурых и смешанных углей, присущ ряд отрицательных свойств, характерных для некоторых глин, а именно: способность набухать, терять механическую связность в воде и увеличивать объем при замерзании и во влажном состоянии.



Фиг. 7. Микроструктура кварцево-слюдисто-глинистой породы с прожилками органики (черные). Без анализатора, $\times 76$



Фиг. 8. Микроструктура глинисто-железистой породы. Без анализатора, $\times 20$

Последняя выделенная нами составляющая рыхлых подмосковных бурых углей относится к глинисто-железистой разновидности. В антрацитовых шлаках она не встречается. Судя по химическому (табл. 1) и минералогическому анализам, в ней очень много железа и серы. По внешнему виду эта разновидность состоит из кусочков

черной глинисто-железистой породы, поры которой с поверхности покрыты красно-бурой тонкой корочкой.

Под микроскопом это — черная непрозрачная масса, богатая органикой и, судя по поведению ее в отраженном свете, — сульфидами и магнетитом; в порах последний окислен до гематита и бурых окислов железа (фиг. 8).

Эта составляющая обладает наибольшим удельным и объемным весами. На основании наших опытных данных выясняется, что присутствие глинисто-железистой составляющей очень плохо отражается на бетоне при использовании буроугольного шлака как заполнителя. Наличие 12—15% этой разновидности в шлаке вызывает быстрое разрушение раствора или бетона.

Судя по химическому анализу, в этой разновидности шлака присутствует много сульфидов железа, образованных за счет пирита и марказита, которые содержатся в угольном пласте и вмещающих породах. При горении угля в топке сульфиды железа окисляются до Fe_2O_3 и, отчасти, FeO , но, как показывает анализ, значительная часть сульфида сохраняется в шлаке. При использовании шлака со значительным содержанием глинисто-железистой составляющей в качестве заполнителя для бетона сульфиды эти, переходя в водные сульфаты, служат причиной разрушения бетона.

ШЛАКИ ОТ СЖИГАНИЯ АНТРАЦИТОВЫХ УГЛЕЙ

В отличие от буроугольных шлаков, образующихся из многозольных и малокалорийных углей в условиях сравнительно невысоких температур, антрацитовые шлаки получаются в результате сгорания высококалорийного угля при более высоких температурах. Последнее обстоятельство в сочетании с наличием в антраците и вмещающих его породах значительного количества железистых соединений (8—18% Fe_2O_3) обуславливает ббльшую, чем у буроугольных шлаков, оплавленность кусочков шлака и вообще значительно более высокое содержание собственно шлаковой составляющей. Это и наличие в шлаках крупных вкраплений кварца придает шлаковым кусочкам прочность и химическую стойкость.

В табл. 3 приводится определенное нами процентное содержание разных составляющих в изученных нами антрацитовых шлаках по трем их фракциям.

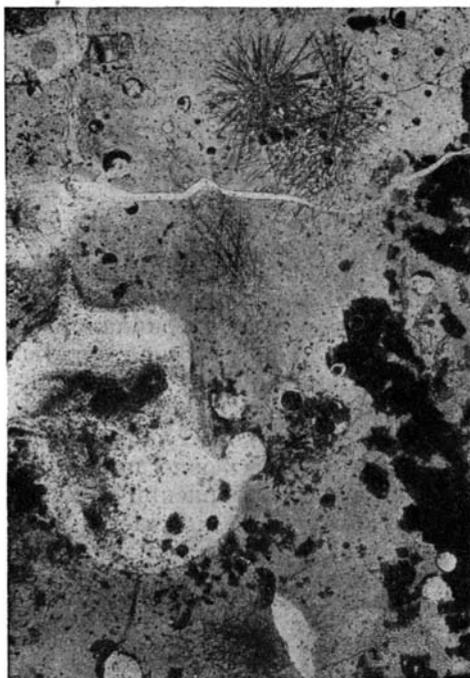
Таблица 3

Содержание разных составляющих в трех фракциях антрацитовых шлаков (в %)

№ п/п.	Наименование составляющих шлака	Содержание по фракциям			Среднее для трех фракций
		5—10 мм	10—20 мм	20—40 мм	
1	Собственно шлак	46,1	57,1	70,5	57,9
2	Антрацит, неполностью сгоревший	44,5	36,7	22,5	34,5
3	Глинистая порода, слабо-обожженная	1,5	0	0	0,5
4	Глинисто-слюдистая порода	0,4	2,0	0	0,8
5	Углисто-глинистая (сланцеватая) порода	2,9	2,9	5,6	3,8
6	Кварцево-глинистая порода	2,4	1,2	1,1	1,6

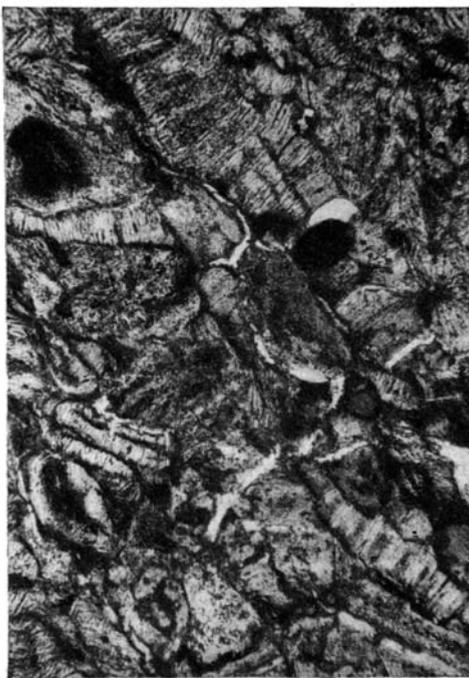
Как видим, разновидности 3 и 4 (табл. 3) такие же, как и для шлаков бурого угля (табл. 2). Углисто-глинистая разновидность в буроугольных шлаках не слоистая, а здесь она сланцеватая; глинисто-железистая разновидность в антрацитовых шлаках отсутствует, но имеется кварцево-глинистая составляющая, которой нет в буроугольных шлаках. В антрацитовых шлаках характерно значительно более высокое содержание собственно шлаковых кусочков (57,9% против 34,7% в буроугольном шлаке) и не полностью сгоревшего угля (34,5% против 17,4%). Характерно также почти полное отсутствие в антрацитовых шлаках слабообожженной глинистой составляющей (0,5%), в буроугольном шлаке играющей весьма существенную роль (41,7%).

Собственно шлаковая составляющая по внешнему виду представляет собою сильно остеклованные куски неправильной формы.



Фиг. 9. Микроструктура ошлакованной кварцево-глинистой породы. Без анализатора, $\times 20$

Черное — магнетит; пучки из тонких иголок — муллит; светлое — метакристаллитизированный кварц в стекле; белое — поры



Фиг. 10. Вермикулитовые сростки в углисто-глинистой породе. Без анализатора, $\times 70$

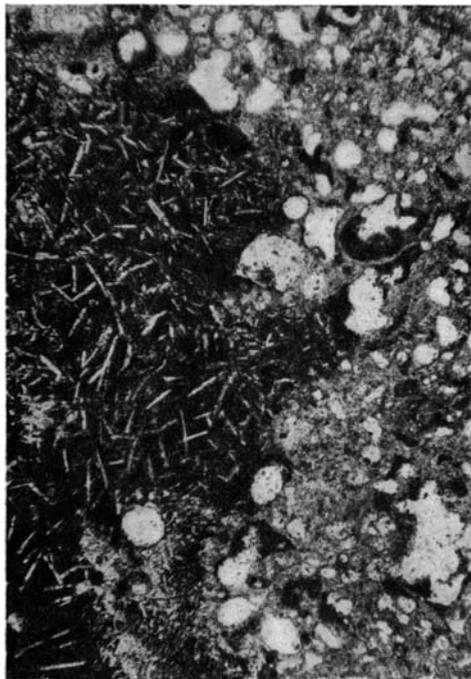
вспученные и пористые. В изломе цвет от темносерого до черного, что обусловлено сплавлением минеральной части в черное стекло. Местами встречаются куски кварца и несгоревшей сланцеватой породы. С поверхности куски имеют красно-бурюю до черной окраску. Химический состав этой разновидности см. в табл. 1.

По микроструктуре это сильно остеклованные куски с реликтами в стекле кварца, в значительной мере метакристаллитизированного, и глинистой породы (фиг. 9).

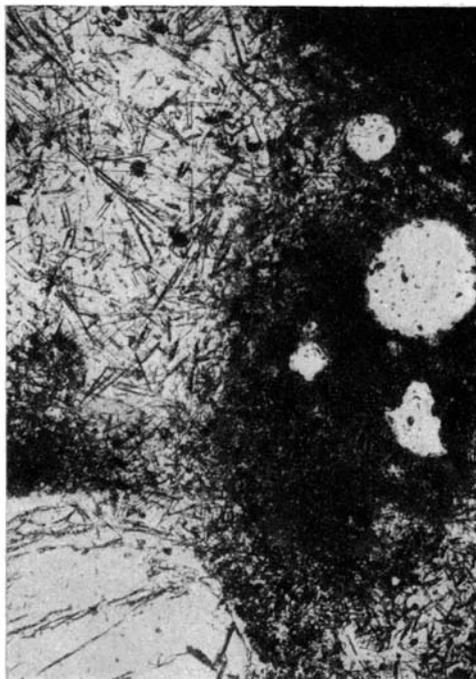
В стекле — кристаллизация магнетита и радиально-лучистые пучки из иголок муллита. Стекло в шлифе или буроватое, или местами черное, непрозрачное.

Следующая разновидность — не полностью сгоревшие частицы антрацита. Вследствие нагревания кусочки местами теряют столь характерный для антрацита металлический блеск и становятся матовыми. Прочность и химическая стойкость этой составляющей при нагревании до 300° изменяется незначительно. Дальнейшее нагревание ведет к быстрому снижению прочности, которая при 400° составляет только 30% от первоначальной. При нагревании до 500° происходит разрушение кусков в порошок черного цвета, при 600° цвет остатка от сгорания угля становится буровато-красным. Этот остаток обладает постоянством объема в затворенных лепешках.

Углисто-глинистая (сланцеватая) разновидность представляет собой кусочки темносерого цвета, с поверхности иногда жел-



Фиг. 11. Ошлакованный участок куска углисто-глинистой породы. Остеклованная пористая (белое—поры) порода с войлоком мелкого муллита (светлая часть снимка) в контакте с участком кристаллизации магнетита (черный) и ауритита (мелкие белые призмочки). Без анализатора, $\times 35$



Фиг. 12. Контакт куска кварца, частично потрескавшегося, со стекловидным пористым шлаком, содержащим удлиненные пластиночки β -глинозема, и с войлоком из иголок муллита (темный участок). Без анализатора, $\times 76$

товато-серые из-за выгорания органики. На некоторых кусочках слабые следы ошлакования. По цвету они всегда несколько светлее, чем кусочки угля.

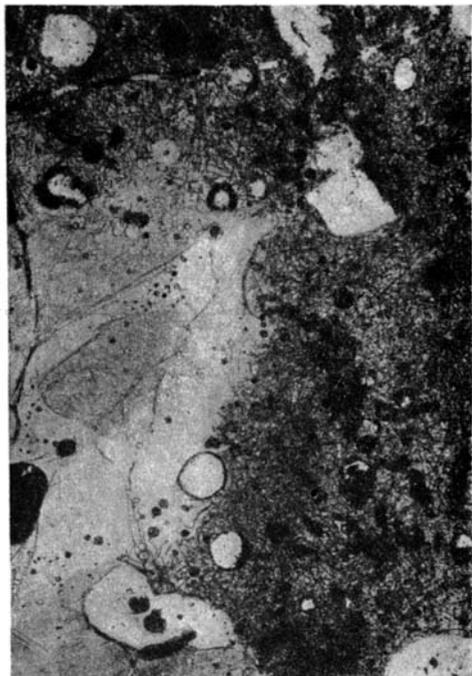
Под микроскопом кусочки представляют собой глинистую породу, состоящую из вермикулитовых сростков тонких листочков глинистого минерала (фиг. 10). Порода пропитана весьма тонкодисперсным темным органическим веществом. В ней наблюдаются немногочисленные зерна кварца и редкие зернышки циркона.

Прочность этой составляющей не велика; она уступает разновидности не полностью сгоревшего антрацита и некоторым видам каменных углей.

В антрацитовых углях в качестве разновидностей углисто-глинистой составляющей, в большинстве сходных с ней по микроструктуре, установлены кусочки глинистой породы, окрашенные в белый, желтый, темносерый цвета в зависимости от содержания в них углистого вещества. Часть кусочков слабо ошлакована и с поверхности покрыта темнобурой корочкой. Большинство кусочков состоит из вермикулитовых сростков глинистого минерала, пропитанного темным органическим веществом. В некоторых кусочках, в отличие от описанной выше углисто-глинистой составляющей, больше кварца, который несколько оплавлен. Присутствуют также более измененные участки глинистого материала, в результате обжига перешедшие в неполяризующую стеклоподобную массу, содержащую зачаточную кристаллизацию муллита. Эти участки сильно пористы и отвечают



Фиг. 13. Контакт метакристаллизованного кварца (светлый) со стеклом, содержащим магнетит (черный). Без анализатора, $\times 20$



Фиг. 14. Контакт кварцевого зерна (светлое), перешедшего в кристобалит и тридимит, с муллитизированным стеклом (темносерый участок). Без анализатора, $\times 20$

ошлакованным зонам кусочков, отмеченным при макроописании образца. В ошлакованной зоне наблюдаются небольшие участки с кристаллизацией в стекле анортита и магнетита, как это представлено на микрофотографии ошлакованного участка (фиг. 11).

Кварцево-глинистая составляющая, довольно характерная для антрацитовых углей, хотя и присутствующая в небольших количествах (1,1—2,4%), представляет собой кусочки оплавленной кварцево-глинистой породы с включением крупных кусков кварца.

В шлифе, приготовленном из этой разновидности, наблюдаются крупные участки из оплавленного и частично по трещинам метакристаллизованного кварца в контакте с глинистой породой, превращенной обжигом в смесь из изотропной фазы и тонкого войлока муллитовых иголок. В контактной зоне кварца с глиной наблюдаются участки из стекла

со щелочным β -глиноземом (тонкие пластиночки и шестиугольные разрезы).

В шлифе встречаются участки, состоящие из сетки магнетитовых скелетных кристалликов и находящегося между ними поляризующего железистого силиката и стекла.

Глинистая порода переходит постепенно сначала в весьма пористую углисто-глинистую (муллитизированную) породу, а затем — в еще менее измененную, но тоже сильно пористую углистую породу. Поры здесь неправильно-удлиненной формы, тогда как в ошлакованной части куска поры округленные. На фиг. 12 представлен контакт крупного куска кварца, потрескавшегося и частично метакристобалитизированного, со стекловидным пористым шлаком, содержащим β -глинозем, и с муллитизированной глинистой породой.

Иногда в этой разновидности встречаются молочно-белые кусочки кварца, причем в некоторых случаях кварц чередуется с черными углистыми слоями. Поверхность таких кусочков ошлакована и покрыта темнобурой корочкой. Подобные кусочки представлены двумя типами микроструктур:

А. Куски кварца, метакристобалитизированного по трещинкам, находятся в контакте с участками стекла, содержащего большие количества магнетита. Стекло частично девитрифицировано (фиг. 13).

Б. Куски кварца, перешедшего в тридимит и кристобалит, находятся в контакте со стеклом, переполненным крупными или мелкими иголочками муллита (фиг. 14 и 15).

В табл. 1 приводится химический анализ кварцево-глинистой составляющей. Преобладание в ней

кварца согласуется с весьма высоким содержанием кремнекислоты (86,40%). Небольшая потеря при прокаливании (2,55%) связана с неполным выгоранием органики.

В очень небольшом количестве (0,01—1,5%) в антрацитовых шлаках встречаются слабообожженные глинистые кусочки. Свойства этой составляющей аналогичны таковым в буроугольных шлаках, но прочность и твердость ее выше, чем в шлаках бурых углей, что, повидимому, связано с отсутствием невыгоревшей органики и наличием кварца в этой разновидности антрацитовых шлаков.

Как и в буроугольных, в антрацитовых шлаках в небольшом количестве присутствует глинисто-слюдиная составляющая, охарактеризованная уже нами выше в химическом и минералогическом отношении.

ШЛАКИ СМЕШАННЫХ УГЛЕЙ

Этот вид шлаков имеет наибольшее распространение среди всех видов топливных шлаков и содержит несколько больше составляющих, чем буроугольные и антрацитовые шлаки. В него могут входить шлаки всех



Фиг. 15. Контакт кварцевого зерна, перерожденного в тридимит (светлые зерна) и метакристобалит (темные участки), с участком из войлока муллитовых иголочек. С анализатором, $\times 20$

видов углей — бурых, каменных, антрацита, а иногда и горючих сланцев. Смешанные виды топлива употребляют в котельных установках фабрик, заводов, коммунальных хозяйств, в паровозных топках и т. п.

Шлаки паровозных топок имеют две особенности, выгодно отличающие их от других видов смешанных шлаков: во-первых, они получают как продукт довольно строго регламентированного процесса горения топлива в топке паровоза и, во-вторых, для определенного железнодорожного района состав топливной смеси установлен в определенных пределах, что позволяет иметь здесь шлаки сравнительно устойчивого состава. Последнее обстоятельство облегчает их практическое применение.

В табл. 4 приводится процентное содержание составляющих смешанных шлаков по трем их фракциям.

Таблица 4
Содержание разных составляющих в трех фракциях шлаков смешанного топлива (в %)

Наименование составляющих шлана	Содержание по фракциям			Среднее для трех фракций
	5—10 мм	10—20 мм	20—40 мм	
Собственно шлак	24,1	19,8	33,4	25,8
Уголь, неполностью сгоревший (бурый, каменный, антрацит)	16,0	21,1	21,1	19,4
Глинистая слабообожженная порода	50,2	49,3	26,5	42,0
Глинисто-сланцевая порода	1,9	2,1	5,4	3,1
Кварцево-глинистая порода	0,2	0,2	0,0	0,2
Углисто-глинистая (неслойчатая и сланцеватая) порода	2,7	0,5	3,3	2,2
Глинисто-железистая порода	1,9	0,9	3,3	2,0
Кокс	4,2	6,1	2,1	4,1

Для смешанных шлаков характерно высокое содержание глинистой слабообожженной составляющей (шлаки Октябрьской и Курской ж. д.).

Все составляющие этих шлаков, кроме одной, сходны с таковыми буроголистых и антрацитовых шлаков и были уже описаны выше.

Новая составляющая представлена кусочками кокса, возникающими за счет частичного оковывания каменного угля при обжиге почти без доступа воздуха. По внешнему виду кокс представляет собой сильно пористую, черную без блеска массу. Объемный вес кокса — наименьший из всех составляющих шлана смешанных углей, а прочность его обычно больше, чем прочность бурого угля. Оковывавшиеся частицы угля обладают достаточной стойкостью и не вступают во взаимодействие с цементом при использовании подобного шлана как заполнителя в бетоне.

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВНЫХ ШЛАКОВ

Для практической оценки топливных шлаков нами были изучены физико-химические свойства (пористость, удельный и объемный веса, изменение объема при увлажнении, гигроскопичность, морозостойчивость

и пр.) для каждой из выделенных относительно однородных составляющих шлака. Результаты этого изучения приводятся в табл. 5—7.

Таблица 5

Результаты испытания однородных составляющих топливных шлаков на присутствие в них гуминовых кислот и определения рН и гигроскопичности

Наименование составляющих	Окраска		рН	Гигроскопичность (в %) ***
	раствора едкого натрия *	раствора метиленовой сини **		
Уголь бурый, неполностью сгоревший	Слегка желтоватый оттенок	Прозрачный	6,5	3,47
Слабообожженная глинистая порода	Прозрачный (не окрашен)	Светлоголубой	6,5	1,55
Глинисто-сланцевая порода	То же	Светлоголубой, значительно светлее эталона	6,5—7,0	2,23
Кварцево-глинистая порода	» »	Темносиний	7,0	0,43
Углисто-глинистая (неслоистая) порода	» »	Прозрачный	6,5	3,66
Углисто-глинистая (сланцеватая) порода	» »	Светлоголубой, светлее эталона	6,5—7,0	2,25
Глинисто-железистая порода	Светложелтый лимонный (много светлее эталона)	То же	5,0—5,5	7,30
Кокс	Прозрачный	Прозрачный с чуть заметным голубым оттенком	7,5	4,06
Собственно шлак антрацита	»	Темносиний	7,0	0,2

* Появление окраски раствора едкого натрия свидетельствует о наличии в образце гуминовых кислот.

** Темносиний цвет раствора указывает на отсутствие в образце гуминовых кислот, ослабление окраски — на их наличие в образце.

*** Привес образцов, высушенных до постоянного веса и затем выдержанных в эксикаторе над водой тоже до постоянного веса.

Было установлено, что в неполностью сгоревших частичках углей присутствуют гуминовые кислоты. Это вызывает ухудшение строительных качеств топливных шлаков, содержащих угольные частички; полностью же освободиться от них затруднительно. Гуминовые кислоты — гидрофильные и обладают большей способностью к набуханию. Содержание гуминовых кислот в бурых углях может достигать до 50%; в каменных углях, не подвергнутых нагреванию, они почти отсутствуют, а в необожженных антрацитах их совсем нет. Однако и в каменных, и в антрацитовых углях гуминовые кислоты могут появиться при нагревании. При использовании существующих методик качественного определения гуминовых кислот раствором едкого натрия или метиленовой сини были произведены соответ-

ствующие определения для бурых и антрацитовых углей, нагретых до разных температур (от 150 до 800°), а также для выделенных нами однородных составляющих топливных шлаков. В результате оказалось, что интенсивность окраски раствора едкого натрия бурыми углями по мере повышения температуры предварительного нагревания углей ослабевает, что свидетельствует об уменьшении содержания в них гуминовых кислот. Антрацитовый уголь, нагретый до 250°, дает окраску с 3%-ным раствором едкого натрия, что свидетельствует о появлении в угле гуминовых кислот. Дальнейшее нагревание (выше 250°) ведет к уменьшению количества гуминовых кислот, а при 400° они исчезают.

Проба с раствором едкого натрия показала, что гуминовые кислоты присутствуют практически лишь в разности неполностью сгоревшего бурого угля и глинисто-железистой, тогда как пробы с метиленовой синью дали, кроме того, указание на присутствие гуминовых кислот и в других однородных разностях шлака (табл. 5).

Большая гигроскопичность, выявленная у кокса (4,06%) и весьма высокая его пористость (70%), как мы отмечали выше, при описании этой разности шлаков смешанных углей, не сказываются отрицательно на ее прочности и стойкости.

Таблица 6

Результаты определений удельного и объемного весов, пористости и изменения объема при увлажнении образцов однородных составляющих топливных шлаков

Наименование составляющих	Уд. вес в порошке, (в г/см ³)	Объемный вес в сухом состоянии (в кг/м ³).	Пористость (в %)	Изменение объема (в %) в результате увлажнения в течение 2 1/2 часов
Уголь бурый, неполностью сгоревший	1,76	1051	40	1,83
Слабообожженная глинистая порода	2,070	1433	50,4	1,60
Глинисто-слюдистая порода	2,005	1743	17	1,20
Кварцево-глинистая порода	2,585	2438	5,7	0,20
Углисто-глинистая (неслоистая) порода	2,022	1459	35	—
Углисто-глинистая (сланцеватая) порода	2,22	1302	43,7	1,04
Глинисто-железистая порода	3,215	2685	16,6	Поверхностное разрушение (обкрошивание)
Кокс	1,720	513	70	
Антрацит, неполностью сгоревший	1,71	—	—	0,30
Уголь каменный, неполностью сгоревший	—	—	—	0,40
Собственно шлак в шлаках подмосковного угля	2,76	2000	—	0,3
Собственно шлак в шлаках смешанных углей	2,69	1930	28	0,18
Собственно шлак в шлаках антрацита	2,81	2264	19,6	Нет

Наибольшее изменение объема наблюдалось у разностей слабообожженной глинистой породы и у частичек неполностью сгоревшего угля, а для глинисто-железистой составляющей отмечено даже поверхностное

разрушение образца при его увлажнении (табл. 6). У этих же трех составляющих наблюдается, согласно данным табл. 5, и довольно высокая гигроскопичность.

В табл. 7 приводятся данные по испытанию на морозоустойчивость выделенных нами восемь составляющих топливных шлаков. Наилучшую морозоустойчивость показали кварцево-глинистая и собственно шлаковая (как подмосковных, так и антрацитовых углей) разновидности, подвергавшиеся 25-кратное замораживание. Плохую стойкость проявили глинисто-железистая, углисто-глинистая, неполностью сгоревший бурый уголь и слабообожженная глинистая составляющие.

ОБОБЩЕНИЕ

Для детального изучения состава и свойств крайне неоднородных по составу рыхлых топливных шлаков нами был применен прием выделения в них по внешнему виду и химико-минералогическим данным более или менее однородных составляющих, для которых и изучались далее некоторые их физико-химические свойства.

Таблица 7

Испытание составляющих топливных шлаков на морозоустойчивость
(25-кратное замораживание и оттаивание)

Наименование составляющих	Вес в сухом состоянии до испытания (в г)	Вес в сухом состоянии после испытания (в г)	Потеря в весе		Количество целых образцов		Наблюдения
			г	%	до испытания	после испытания	
Уголь бурый, неполностью сгоревший . .	42,69	40,00	2,69	6,30	5	2	Начиная с 7-го цикла — разрушение образцов с отслаиванием кусочков
Слабообожженная глинистая порода	58,36	55,80	2,56	4,39	5	3	То же, но отслаивание в меньшей степени
Глинисто-слюдистая порода	59,47	58,40	1,07	1,80	5	4	Начиная с 5-го цикла — отслаивание и отпадение кусочков
Кварцево-глинистая порода	46,75	46,65	0,10	0,21	5	5	Все образцы целы
Углисто-глинистая (не слоистая) порода . .	34,76	33,75	1,01	2,88	5	1	Образцы разрушились после 4-го цикла
Глинисто-железистая порода	45,65	44,70	0,95	2,08			То же с 5-го цикла
Собственно шлак подмосковных углей . .	45,86	45,75	0,11	0,24	5	5	Все образцы целы
Собственно шлак антрацита	51,20	51,20	0	0	5	5	То же

В исследованных буроугольных и антрацитовых шлаках и в шлаках смешанных углей выделены следующие однородные разновидности: 1) частички не вполне сгоревшего угля (бурого, антрацита, каменного); 2) глинистая, слабообожженная порода; 3) глинисто-слюдистая; 4) углисто-глинистая неслоистая; 5) углисто-глинистая сланцеватая; 6) кварцево-глинистая; 7) глинисто-железистая; 8) кусочки кокса; 9) кусочки собственно шлака от сгорания углей (бурого, каменного, антрацитового и смешанных).

Было установлено для изученных нами шлаков бурых, антрацитовых и смешанных углей также и количественное содержание в них всех перечисленных разновидностей по трем фракциям: 5—10, 10—20 и 20—40 мм. Наибольшее количество частичек несгоревшего угля оказалось в антрацитовых шлаках (в среднем 34,5%, а во фракции 5—10 мм — 44,5%). Максимальное содержание кусочков слабообожженной глинистой породы установлено в шлаках бурых углей (41,7% в среднем, а во фракции 5—10 мм — 59,5%). Собственно шлаковая составляющая максимально представлена в шлаках антрацитовых углей (в среднем 57,9 и 70,5% во фракции 20—40 мм).

Изучением химико-минералогического состава и некоторых физико-химических свойств (пористость, гигроскопичность, изменение объема при увлажнении, удельный вес, объемный вес, морозоустойчивость и т. д.) выделенных составляющих топливных шлаков выявлено, что особо неблагоприятные показатели при оценке пригодности топливных шлаков в качестве заполнителя в бетонах и растворах дают следующие три разновидности бурых углей: неполностью сгоревший уголь, частички слабообожженной глинистой составляющей и глинисто-железистые кусочки. Слабообожженные глинистые и углистые частички сосредоточены главным образом в более тонкозернистой зольной части шлака, рассматриваемой нами как самостоятельная шлаковая составляющая.

Выше было показано, что частицы неполностью сгоревшего бурого угля и слабообожженной глины обладают большой гигроскопичностью и значительно изменяют объем при увлажнении, а для глинисто-железистой составляющей, содержащей сульфиды, которые под действием окисления и влаги переходят в сульфаты, отмечено при увлажнении также и разрушение образца с поверхности.

К неблагоприятному влиянию указанных трех составных частей шлака бурых углей на стойкость шлако-бетона иногда добавляются еще объемные нарушения из-за взаимодействия с водой неполностью погасившихся известковых включений, а также наличие растворимых солей, главным образом сернокислых.

Очевидно, что шлаки бурых подмосковных углей, содержащие большое количество трех указанных выше составных частей (несгоревший уголь, слабообожженные глинистые и глинисто-железистые кусочки), должны с осторожностью применяться в качестве заполнителя в бетоне.

В связи со сказанным понятно, что научно-техническое совещание по строительству признало нецелесообразным применение в капитальном строительстве Москвы шлакобетонных изделий, изготовленных на шлаках подмосковных углей (Попов, 1954). Однако после соответствующего обогащения (агломерации и пр.) эти шлаки смогут быть использованы и в бетоне. Необходимо форсировать проведение и окончание исследовательских работ по обогащению буроугольных шлаков.

Шлаки антрацита могут служить заполнителями в бетоне и в большинстве случаев не нуждаются в особой подготовке, кроме улучшения зернового состава.

К шлакам смешанных углей необходим дифференцированный подход. Если эти шлаки выдерживают испытание на постоянство объема, то их

можно использовать после частичного обогащения (удаление угольных частиц и зольной части), если же такие шлаки показывают значительное изменение объема, то их следует аггломерировать.

Большие запасы и все увеличивающиеся ежегодные выходы топливных шлаков, а также весьма широкое их распространение обязывают к дальнейшим исследовательским усилиям как по более детальному изучению природы и свойств топливных шлаков, так и по изысканию путей их наиболее полного и целесообразного практического использования.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Б е л я н к и н Д. С. и Л а п и н В. В. Сланцевозольные шлаки — «щелочная» техническая порода. Зап. Миш. общ., 1945, ч. 74, № 2, 144—154.
- П о п о в А. Н. Строительные материалы для Москвы. Строит. пром., 1951, № 4, 10—13.
-

Ю. А. РОЗАНОВ

**ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ГОРНЫХ ПОРОД НА АНИЗОТРОПНОСТЬ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ**

Степень ориентированности минеральных зерен, слагающих горную породу, является важнейшим фактором, обуславливающим анизотропность механических свойств ее.

Анизотропность механических свойств горных пород — явление, давно известное и широко используемое работниками камнедобывающей и камнеобрабатывающей промышленности. Она отмечалась рядом исследователей при изучении физико-механических свойств различных горных пород. Так, например, Б. В. Залесский и Б. П. Беликов (1934) отмечают механическую анизотропность некоторых пород северной Карелии; Б. Я. Рамзес и В. А. Сыромятников (1933) указывают, что известняки-ракушечники имеют различное временное сопротивление сжатию в направлениях, параллельном и перпендикулярном слоистости; М. И. Койфман (1932) при исследовании свойств кровельных сланцев Черноморского побережья установил резкую разницу механических свойств их в направлении, параллельном сланцеватости, и в направлении, перпендикулярном ей. Ю. А. Розанов (1938) приводит аналогичные данные для сланцев Северного Кавказа и Украины, а в обзорной работе Ю. А. Розанова, Д. В. Соловьева и Д. Я. Терскова (1941) приводятся данные по мраморам, мраморовидным известнякам и некоторым другим породам разных районов СССР.

Подобные же сведения встречаются и в работах иностранных авторов — Гиршвальда, Штокке, Боульса. Однако попыток установить какие-либо закономерности, связывающие структуру породы с ее физико-механическими свойствами и, в частности, с анизотропностью механических свойств, указанные выше авторы не предпринимали.

Гиршвальд в своей работе (Hirschwald, 1912) указывает, что Баушингером, а затем Ханишем были сделаны весьма несовершенные попытки установить взаимозависимость механических констант разных горных пород (табл. 1). Поскольку эти попытки и сравнения были проведены для крупных петрографических групп, без учета структурных особенностей различных разновидностей в пределах этих групп, картина получалась очень неясная.

Из табл. 1 видно, что для всех пород наблюдаются перекрытия как в абсолютных значениях отдельных констант, так и в цифрах отношений связанных между собой испытаний. Указанные выше методологические дефекты работы этих авторов заставляют нас признать приведенные в табл. 1 данные неудовлетворительными, они не освещают интересующих нас зависимостей и не позволяют подметить какие-либо закономерности.

Взаимозависимость механических констант некоторых горных пород
(по Баушингеру и Ханяшу)

Порода	Временное сопротивле- ние сжатию	Временное сопротив- ление изгибу	Отношения
	кг/см ²		
Граниты	772—2041	92—242	От 1 : 7,7 до 1 : 12,2; в среднем 1:10,0
Песчаники	692—1839	38—215	От 1 : 5,8 до 1 : 15,9; в среднем 1:10,8
Карбонатные породы	681—1915	67—210	От 1 : 4,7 до 1 : 11,3; в среднем 1:8,0

Многочисленные исследования механических свойств горных пород на ориентированных образцах, проведенные в 1942—1952 гг. в Лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород Института геологических наук Академии Наук СССР, позволили собрать достаточный материал для предварительного суждения о зависимостях между структурой и механическими свойствами пород разного состава и происхождения.

Мы различаем: 1) структуры, обусловленные главным образом формой и характером взаимного расположения минеральных зерен (пористость при этом минимальная); 2) структуры, обусловленные в значительной мере характером и расположением пор (пористость 15—20% и более).

Для наших обобщений были выбраны породы, в которых наблюдались структуры первого типа. Сравнение цифр по таким породам значительно легче, так как структурные факторы выступают здесь в относительно чистом виде. Исследования проводились на породах, характеризовавшихся преимущественно малой пористостью, обычно составляющей 0,5—2,0%. Лишь у небольшого числа образцов пористость достигала 8—12%. Исследованиям были подвергнуты граниты и их измененные разновидности, известняки и мраморы, кварциты, глинистые сланцы. Общее количество исследованных проб достигало 100, причем наибольшее число их приходилось на мраморы, известняки и сланцы, для которых вследствие этого и получилась наиболее ясная картина.

Пестрота цифр в пределах каждого вида испытаний, с которой пришлось прежде всего столкнуться, поставила нас перед большим затруднением. Кроме того, цифры, характеризующие даже различные по минералогическому составу породы, давали абсолютные значения констант очень близкие друг к другу. Так, по нашим исследованиям, цифры временного сопротивления сжатию колеблются для гранитов от 1957 до 3380 кг/см², для карбонатных пород — от 855 до 2062 кг/см², для кровельных сланцев — от 692 до 2473 кг/см² и для кварцитов от 1853 до 4204 кг/см². Такая же пестрота цифр и перекрытия абсолютных значений наблюдаются и для временного сопротивления изгибу.

Выход из этого затруднительного положения был найден нами в переходе к сравнению не абсолютных цифр по отдельным видам испытаний, а коэффициентов, характеризующих соотношение результатов по разным связанным друг с другом испытаниям, с учетом макроструктурных особенностей исследованных горных пород.

Для такого сравнения на первом этапе наших исследований были выбраны два коэффициента — K_1 и K_2 .

Коэффициент K_1 характеризует отношение временного сопротивления сжатию перпендикулярно ориентировке зерен в породе к временному сопротивлению сжатию параллельно ориентировке зерен, а коэффициент K_2 — отношение временного сопротивления изгибу к временному сопротивлению сжатию перпендикулярно ориентировке зерен в породе.

Абсолютные средние цифры по отдельным испытаниям и результаты их пересчета на соответствующие коэффициенты приводятся в табл. 2. При этом все исследованные горные породы (в пределах каждой петрографической разновидности) были разбиты нами по грубым макроструктурным признакам, без количественного учета ориентированных в том или ином направлении зерен, на несколько групп. Наиболее четкой является такая разбивка для карбонатных пород, которые нами разделены на следующие четыре группы: нормальные известняки и доломиты, мраморизованные известняки, нормальные мраморы и сланцеватые мраморы. Для глинистых пород были исследованы две группы сланцев — толстоплитчатые, грубо-сланцеватые и тонкоплитчатые, хорошо рассланцованные. Среди исследованных изверженных пород довольно четко выделяются три структурных типа: нормальные граниты и родственные им породы, гранито-гнейсы и гнейсы. Все исследованные кварциты отнесены к одному структурному типу — к породам, сохранившим следы первоначальной слоистости.

Значения K_1 и K_2 для различных типов пород и структурных разновидностей их приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, оба коэффициента (K_1 и K_2) растут по мере увеличения степени ориентированности частиц в породе.

Естественно, что породы, в составе которых в значительном количестве присутствуют минералы табличатого или пластинчатого габитуса, показывают более резкие изменения механических свойств в различных направлениях. Соответственно и более высоки для них значения K_1 и K_2 . Сопоставлением предложенных нами коэффициентов относительно легко устанавливается в пределах того или иного типа пород степень ориентированности минеральных зерен, и появляется возможность более четкого отнесения пород к тем или иным макроструктурным типам.

Из табл. 2 видно, что более высокие значения K_2 имеют более древние граниты, претерпевшие большое число фаз орогенеза. В древних гранитах ориентированность минералов оказалась большей, чем в молодых. Как показали исследования И. В. Гинзбург и Ю. А. Розанова (1951), при деформациях изверженных пород первыми реагируют на давление слюды, которые переориентируются в соответствии с направлением этого давления.

Б. П. Беликов, исследовавший структурные особенности указанных гранитов, установил достаточно четкую ориентированность слюд в древних гранитах и почти полное отсутствие ориентировки этих минералов в молодых гранитах.

Можно считать установленным, что степень динамометаморфизма может быть достаточно точно определена с помощью предлагаемых коэффициентов K_1 и K_2 .

Коэффициенты эти имеют практическое значение и могут быть с успехом использованы для определения возможности применения породы по тому или иному назначению. Так, установлено, что породы с $K_1 > 1,40$ неприменимы при дорожных работах, глинистые сланцы с $K_1 < 1,50$ не раскалываются на тонкие пластинки, т. е. не могут быть использованы как кровельный материал, а мраморы с высоким значением K_1 заведомо непригодны для скульптурных целей.

Интересно отметить, что определявшиеся Б. П. Беликовым значения модуля упругости E (модуль Юнга) для некоторых использованных нами образцов показывают тот же характер изменений, что и коэффициент K_2 . Для карбонатных пород это может быть иллюстрировано данными табл. 4.

Из изложенного видно, что использование предложенных нами коэффициентов позволяет давать сравнительную оценку свойств горных пород в пределах той или иной петрографической группы.

Породы различных петрографических групп, но имеющие сходные макроструктурные признаки, дают значения коэффициентов, близкие

Средние цифры испытаний и пересчеты на коэффициенты K_1 и K_2

Структурные типы	Порода, район, возраст	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)		Временное сопротивление изгибу (в кг/см ²) \perp ориентированные зерен	K_1	K_2
		\perp ориентированные зерен	\parallel ориентированные зерен			
1	2	3	4	5	6	7
А. Изверженные породы						
Нормальные граниты и родственные им породы	Кварцевый диорит, Армения, мезозой	2401	2320	—	1,03	—
	Гранит, Украина, палеозой	2290	—	112	—	0,049
	Гранит, Северный Кавказ, мел	1957	—	97	—	0,053
	Гранит, Украина, архей	3380	—	257	—	0,076
	Гранит, Северный Кавказ, верхний докембрий	2490	2355	—	1,05	—
Гранито-гнейсы	Гранито-гнейс, северная Карелия, нижний докембрий (архей)	3030	2830	334	1,07	0,110
	Гранито-гнейс, южная Карелия, верхний архей — нижний протерозой	2186	2072	—	1,05	—
	Биотитовый гранито-гнейс, северная Карелия, нижний докембрий	2175	2080	273	1,04	0,125
	Биотитовый гнейс, северная Карелия, нижний докембрий	3360	2320	321	1,45	0,095
Б. Карбонатные породы						
Нормальные известняки и доломиты платформ	Подмосковье, средний карбон	1821	—	153	—	0,084
	Подмосковье, средний карбон	2062	2010	—	1,02	—
	Среднее Поволжье, верхний карбон	1680	—	143	—	0,085
	То же	1162	—	150	—	0,128
	» »	1937	—	233	—	0,120
	Подмосковье, нижний карбон	2097	1987	232	1,05	0,110
	Подмосковье, средний карбон	772	722	88	1,07	0,114
	Мраморизованные известняки-складчатых областей	Закавказье, средняя юра	1789	—	226	—
То же	1345	—	241	—	0,179	
Северный Кавказ, карбон и девон	1910	—	303	—	0,159	
Закавказье, девон	1530	—	240	—	0,157	

Таблица 2 (продолжение)

Структурные типы	Порода, район, возраст	Временное сопротивление сжатию (в кг/см ²)		Временное сопротивление изгибу (в кг/см ²) ⊥ ориентировке зерен	K ₁	K ₂
		⊥ ориентировке зерен	ориентировке зерен			
1	2	3	4	5	6	7
Мраморы полнокристаллические	Южный Урал, нижний карбон	1087	—	180	—	0,165
	То же	1415	1137	—	1,24	—
	» »	1276	—	220	—	0,172
	» »	1610	—	309	—	0,192
	» »	1302	1120	203	1,16	0,155
	Кавказ, кембрий	1780	1450	—	1,123	—
Сланцеватые мраморы	Средняя Азия, силур	1789	—	475	—	0,266
	То же	1579	1196	395	1,32	0,250
	Западные Саяны, силур	1162	937	254	1,24	0,218
	То же	1549	—	371	—	0,240
В. Глинистые породы						
Грубосланцеватые толстоплитчатые сланцы (строительный сланец)	Карелия, верхний карелий	1945	1390	388	1,40	0,200
	То же	1693	1114	508	1,52	0,300
Хорошо рассланцованные тонкоплитчатые сланцы	Северный Кавказ, нижняя юра	2294	1527	1030	1,50	0,450
	То же	2473	1817	1187	1,36	0,480
	» »	1632	973	795	1,68	0,487
	Кузнецкий Алатау, верхний девон	692	—	289	—	0,418
	Украина, докембрий	1343	822	522	1,63	0,389
	Урал, палеозой	832	—	401	—	0,482
	Вермонт *	1506	1050	451	1,43	0,300
	Массачусетс *	1951	—	913	—	0,467
	Виргиния *	2053	1333	652	1,54	0,317
Г. Кварциты						
Кварциты плотные со следами первоначальной слоистости	Центральная Карелия, карелий (нижний протерозой)	1853	1783	111	1,04	0,062
	То же	4204	3910	357	1,07	0,085
	Южная Карелия, потный	3277	—	396	—	0,121

* Цифры физико-механических констант по Боулсу, коэффициенты рассчитаны Ю. А. Розановым.

Значения коэффициентов K_1 и K_2

Коэффициенты	Типы пород						
	нормальные известняки	мраморизованные известняки	мраморы	сланцеватые мраморы	глинистые сланцы	нормальные граниты	гранито-гнейсы
K_1	1,02—1,07	—	1,16—1,24	1,24—1,32	1,36—1,68	1,03—1,05	1,04—1,45
K_2	0,084—0,128	0,126—0,179	0,155—0,192	0,218—0,266	0,200—0,487	0,049—0,082	0,095—0,125

Таблица 4

Сопротивления коэффициентов K_2 и E

Структурный тип	Район, возраст	Значения K_2	Значения E (в кг/см ²)
Нормальные известняки и доломиты	Подмосковье, средний карбон	0,114	263 000
Мраморизованные известняки	Закавказье, средняя юра . . .	0,126	686 000
	То же	0,179	634 000
	Северный Кавказ, карбон . . .	0,159	680 000
	Закавказье, девон	0,157	705 000
Мраморы полнокристаллические	Южный Урал, карбон	0,172	652 000
	Южный Урал, нижний карбон	0,192	746 000
Сланцеватые мраморы	Средняя Азия, силур	0,266	838 000
	То же	0,250	809 000
	Западные Саяны, силур	0,218	794 000
	То же	0,240	887 000

между собой. Это также подтверждает принципиальную правильность предложенного нами метода сравнения.

Предлагаемый метод далек от совершенства и требует дальнейшей доработки. Однако уже на данной стадии он может дать определенные положительные результаты и облегчить оценку свойств и определение областей использования разных горных пород.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Г и н з б у р г И. В. и Р о з а н о в Ю. А. Поведение минералов в породах гранитного состава при воздействии высоких давлений. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геол., 1951, № 6.
- З а л е с с к и й Б. В. и Б е л и к о в Б. П. Строительные камни района Кереть — Соностров. Тр. Петр. вист. Акад. Наук СССР, 1934, 13.
- К о й ф м а н М. И. Кровельные сланцы побережья Черного моря. Тр. Инст. прикл. мин., 1932, вып. 12.
- Р а м з е с Б. Я. и С ы р о м я т н и к о в В. А. Крымский известняк-ракушечник. Госстройиздат, 1933.
- Р о з а н о в Ю. А. Обзор месторождений кровельных сланцев. Гизместпром, 1938.
- Р о з а н о в Ю. А., С о л о в ь е в Д. В. и Т е р с к о в Д. Я. Месторождения облицовочных камней в СССР. Гизместпром, 1941.
- H i r s c h w a l d J. Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. Berlin, 1912.

В. Я. СТЕПАНОВ и К. П. ФЛОРЕНСКИЙ

**НАБЛЮДЕНИЯ НАД ХАРАКТЕРОМ РАЗРУШЕНИЯ
БЕЛОКАМЕННЫХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ
ВЛАДИМИРО-СУЗДАЛЬСКОЙ РУСИ XII—XIII вв.****ВВЕДЕНИЕ**

Авторами настоящей статьи — сотрудниками Института геологических наук и Института геохимии и аналитической химии имени академика В. И. Вернадского Академии Наук СССР — была проведена в 1949 г., вместе с архитекторами Владимирской специальной архитектурно-реставрационной мастерской (А. Д. Варганов, М. В. Рудько и др.), первая совместная работа по изучению состояния сохранности белого камня в памятниках архитектуры XII—XIII вв., расположенных на территории Владимирской области.

Работой предусматривалось изучение характера разрушения белого камня и разработка мероприятий по борьбе с разрушениями (которые должны проверяться экспериментальным путем), а также по предупреждению разрушения белого камня в старинных постройках.

Белокаменные постройки Владимиро-Суздальской Руси сложены из тесаных известняков и известкового туфа, применявшегося обычно в виде бутового камня, и лишь в отдельных случаях — штучного, стенового (Рождественский собор в Суздале).

Тесаный камень, размером около $0,3 \times 0,4 \times 0,5$ м, обычно плотно укладывали на известковом растворе в два ряда при возведении стен и по наружному контуру — при сооружении пилонов; промежутки заполняли бутовым (туфовым или известняковым) камнем и заливали известковым раствором.

Камень гладкой стены украшали резьбой, часто покрывали фресковой росписью.

Прямых указаний на месторождения, из которых добывали белый камень в XII в., не найдено. Существует мнение, будто его привозили из Волжских Болгар, но Н. Н. Воронин (1945) считает это мнение необоснованным. Добыча камня велась, повидимому, в окрестностях г. Коврова, хотя литературные указания об этих месторождениях относятся только к XVII в., когда в вотчине Ефимьевского монастыря — Коврове — готовили известь для Суздальского Покровского монастыря.

В справочнике по памятникам архитектуры Владимирской губ. Н. Н. Ушакова (1913) упоминается о том, что известковый камень для реставрации Успенского собора (XII в.) во Владимире был взят близ

с. Георгиевского, Меленковского уезда, Владимирской губ., между Судогой и Муромом.

Фауна, собранная нами в известняках белокаменных построек Кидекши (церковь Бориса и Глеба) и г. Юрьева-Польского (Георгиевский собор), была определена Е. А. Ивановой в Палеонтологическом институте Академии Наук СССР. В образце из Кидекши (блок № 100) обнаружены: брахиоподы — *Chonetes carboniferus* K e y s., *Dictyoclostus moelleri* S t u c k., *Marginifera karniolica* S c h e l l w., *Brachythyrina strangwaysi* V e r n., *Choristites mosquensis* F i s c h. (типичная форма); *Derbyia* sp. (обломок), мшанки — *Polypora* sp. и кораллы — *Rugosa* — *Bothrophyllum conicum* T r d. Эта фауна указывает на принадлежность вмещающих известняков к мячковскому горизонту среднего карбона. Общий комплекс и характер сохранности этой фауны близки к такой же фауне из «белого строительного камня» в известнях Мячковских разработках.

В образце из Георгиевского собора в Юрьеве-Польском (блок № 113) определены: брахиоподы — *Dictyoclostus* sp. (обломок), *Choristites sowerbyi* F i s c h., *Ch. sowerbyi* F i s c h. var. *alata* A. et E. W a s s. Эта фауна напоминает по общему характеру фауну окрестностей г. Касимова и позволяет отнести вмещающие известняки к верхам среднего карбона (мячковский + подольский горизонты).

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПОСТРОЕК ИЗ БЕЛОГО КАМНЯ

Результаты осмотра сооружений из белого камня, проведенного нами в ноябре 1949 и сентябре 1950 гг., позволяют выделить три основных типа разрушения белого камня.

1. Разрушения механического характера здания в целом и отдельных элементов его, связанные в основном с распорами от нагрузки сводов, приводят к отклонению поддерживающих элементов от вертикали наружу.

Особенно резко это наблюдается в Дмитриевском соборе (г. Владимир) и Георгиевском соборе (г. Юрьев-Польский).

При анализе этих разрушений необходимо напомнить весьма бурную историческую судьбу этих зданий, подвергавшихся многочисленным пожарам и разграблениям.

А. В. Столетов, реставрирующий Дмитриевский собор, приходит к выводу, что разрушение собора не связано с какими бы то ни было нарушениями фундамента, а происходит вследствие неправильного распределения нагрузок в верхней части собора.

Представляется вероятным, что расседание древних построек не было необычным и является причиной преждевременного разрушения многих церквей, не сохранившихся до нашего времени. Это особенно вероятно для построек московского периода.

Возможно, что в значительной степени для борьбы с расседаниями многие церкви в XVI—XVII вв. были дополнены боковыми приделами, играющими роль контрфорсов.

Мы позволили себе остановиться на этом указании для того, чтобы его можно было учесть при реставрации древних зданий, связанной с уничтожением позднейших пристроек, которое должно производиться достаточно осмотрительно.

Борьба с разрушениями этого типа требует чисто инженерных решений и не может рассматриваться в настоящей работе.

2. Разрушения, связанные с морозным выветриванием, проявляются в растрескивании и выкрашивании отдельных камней, обычно в местах максимального увлажнения камня с наружной стороны здания.

Такие разрушения происходят из-за неисправности крыш, водосточных труб, а также вследствие неправильных конструктивных решений при

перестройках, и приносят значительный вред, так как могут развиваться достаточно быстро при отсутствии надлежащего присмотра за ремонтом и сохранностью постройки.

Это можно наблюдать как на северо-восточной части алтаря Рождественского собора в г. Суздале, где явно разрушается цокольная часть здания от неисправности водосточной трубы, так и в других местах.

Меры борьбы с разрушениями этого типа складываются из обычных мероприятий профилактического характера, предохраняющих здание от непосредственного действия воды, и не требуют специальных пояснений.

3. Разрушения, приуроченные к защищенным от непосредственного воздействия воды частям построек (наружные порталы и внутренние части здания, иногда в меньшей степени и оконные проемы), проявляются в основном в виде так называемого «мучнистого» выветривания.

Этот тип разрушения, непосредственная причина которого неясна, может развиваться очень быстро и приводит в полную негодность не только отдельные блоки камня, но и целые плоскости стен. Такому разрушению подвергаются как внутренняя белокаменная облицовка и известь в пазах между блоками камня, так и штукатурка, плотно прилегающая к каменной облицовке. Это разрушение широко распространено во всех наблюдавшихся нами старинных постройках и подвергалось основному изучению в настоящей работе. Анализу причин этого разрушения посвящается отдельная глава, после описания фактического состояния построек к которому мы и переходим.

Георгиевский собор в г. Юрьеве-Польском. Этот собор заложен в 1152 г. на берегу р. Колокши Юрием Долгоруким, затем, в 1230—1234 гг., переделан Святославом. В XV в. верх собора был разрушен и в 1471 г. его переложил на $\frac{3}{4}$ из старых камней мастер Ермолин.

Известняки, первоначально гладкой тески (обр. № 210, 220), с ритуальными крестами, наблюдаемыми в восточной абсиде, были украшены Святославом богатой резьбой, прекрасно сохранившейся по настоящее время. Цоколь (обр. № 113, 114) обнаруживает следы расслаивания (обр. № 221) и морозного выветривания по трещинам механического характера.

Внутри собора обычны желтоватые разности известняков, иногда выветрелые до состояния муки (обр. № 112). Западные пилоны сложены монолитами известняков, внизу гладкой тески, а выше, в 2 м над уровнем пола, штрихованные грубой насечкой для лучшего крепления штукатурки; возможно, что это указывает на разное время установки камня.

Разрушение, приводящее к превращению камня и штукатурки в муку, идет весьма интенсивно и, по словам старожил, значительно прогрессирует в последние годы. Интенсивность разрушения такова, что через месяц после уборки порошка разрушившегося материала он появляется вновь во многих местах.

Стены сильнее всего разрушаются на высоте 1,20—1,50 м от уровня пола с северной стороны и на высоте около 2 м с южной стороны церкви.

Разрушение камня сильнее всего идет от углов и швов, распространяясь по всей поверхности блоков; связывающая известь выкрашивается в первую очередь. Штукатурка сильно разрыхляется и отваливается кусками или осыпается в виде мелкого порошка.

Наибольшее разрушение камня можно видеть на северо-западном пилоне, с северо-западной стороны его, находящейся против выбитого окна; очень сильно разрушается также северо-восточный портал гробницы Святослава и северо-восточная часть горнего места алтаря. Несколько слабее разрушается юго-западный пилон, где зона максимального разрушения поднимается до 2,5 м. Выветривание здесь «мучнистое» и иногда почти равномерно распределено по всей поверхности блока, а иногда принимает

вид отдельных «язв» — углублений округлой или удлиненной формы, до 1—2 см глубиной и от 1—2 см до 10 см в поперечнике.

Несколько отличается характер выветривания, наблюдаемый в алтаре, где наряду с типичным мучнистым выветриванием можно видеть образование корочек отслаивания (обр. № 17), при наличии которых камень отделяется тонкими, в 1—2 мм, пластинками в несколько слоев, параллельно поверхности стены.

Поверхность разрушающихся камней во многих местах покрыта белыми солевыми выцветами, так называемой «ямчугой», то игольчатого строения, то образующими тонкие отслаивающиеся корочки, слегка напоминающие «накипь». Выцветы развиваются особенно интенсивно около швов камня и по штукатурке, т. е. в наиболее пористых участках стены (обр. № 214, 215).

Химический анализ выцветов показывает, что они представляют собой сложную смесь переменного состава, состоящую в основном из сульфатов натрия и магния в растворимой части и гипса и карбоната кальция в нерастворимой; растворимая часть резко преобладает. Подчиненное значение, вплоть до полного отсутствия, имеют различные хлориды.

При качественном анализе штукатурок установлено, что древнейшие штукатурки северо-западной стены собора с позднейшей масляной окраской (обр. № 214) являются известковыми, нацело карбонатизировавшимися, с песчаным наполнителем и отдельными растительными (льняные очески?) волокнами. Они дают лишь слабую реакцию на SO_4 .

Более новая штукатурка с поверхности юго-западного пилона (обр. № 212, 216) имеет известково-гипсовый или гипсовый состав.

Разрушившиеся в «муку» камни (обр. № 213) состоят в основном из кальцита и обнаруживают лишь незначительную примесь зерен доломита.

Интересно, что в кирпичном подвале электростанции, расположенной в помещении нового собора, находящегося в 50 м от Георгиевского, на кирпиче в некоторых местах имеются выцветы (обр. № 219), похожие на те, которые наблюдались нами на камне, но в них, наряду с сульфатами, присутствует примесь карбоната натрия и некоторое количество $Ca(OH)_2$, отчего они обнаруживают резко щелочную реакцию с фенолфталеином.

Следует отметить, что среди всех осмотренных нами памятников XII—XIII вв. для Георгиевского собора отмечено наиболее сильное развитие выветривания во внутренних частях храма.

Укажем еще, что резные камни снаружи не несут следов разрушений и покрыты многочисленными слоями известковой побелки.

Рождественский собор в г. Суздале. Этот собор построен в 1222—1225 гг. на месте старого, заложенного еще Владимиром Мономахом храма, остатки которого обнаруживаются лишь при раскопках. Интересны летописные указания, что строили его русские мастера. Затем новый храм был «подписан и измощен мрамором красным, разноличным», под чем Н. Н. Воронин подразумевает разноцветную майоликовую плитку.

В 1528 г. появилась угроза падения храма, поэтому он был разобран сверху почти на $\frac{2}{3}$ и построен на старом белокаменном основании. Конструктивной особенностью собора является применение во внешней стеновой кладке известковых туфов, обычно шедших только для забутовки.

Собор неоднократно подвергался сильнейшим пожарам, и его несколько раз реставрировали. В конце XIX в. кирпичные части собора снаружи были покрыты серой цементной штукатуркой, а белокаменный резной аркатурный пояс был покрыт масляной краской. Изнутри собор расписан масляными красками.

На шероховатом фоне известкового туфа (обр. № 97) четко выделяется известковая белокаменная кладка в гладко тесаной фактуре (обр. № 98) и резные детали храма (фиг. 1) ¹.

Размеры туфовых монолитов составляют примерно $30 \times 15 \times 10$ см при общей толщине стены около 1,7 м.

С внутренней стороны церкви наибольшему разрушению подвергаются стены алтаря. Стены здесь заставлены деревянным иконостасом, за ним на высоте 0,5—1,5 м от пола разрушение зашло очень далеко. В северо-восточной части горнего места центрального алтаря около ниши погребения в стене образовалась пещерка в 20—30 см глубиной, возможно,



Фиг. 1. Суздаль. Рождественский собор. Южный портал. Стены из известкового туфа и резная колонна из известняка, покрытая цементной штукатуркой в XIX в.

частично искусственного происхождения. Дно ее заполнено каменной «мукой», покрытой солевыми выцветами (обр. № 223—226).

Снаружи собора наблюдается значительное разрушение стены морозного характера, связанное с неисправностью водосточных труб, спускающихся с крыши (фиг. 2).

Белокаменный пол в северной абсиде явно влажен по внешнему виду и наощупь, несмотря на хорошую сухую погоду, установившуюся за две недели до осмотра (31 октября 1949 г.). Кирпичный фундамент под престол в этом приделе покрыт белыми, плотными солевыми выцветами (обр. № 224).

¹ Все фотографии, приведенные в настоящей статье, сделаны Г. П. Вишневым.

В главном корабле церкви наибольшему разрушению подвергается западная стена южной части придела, ведущего к южному portalу. Солевые выцветы широко развиты в нишах над надгробиями около гробницы Святослава, младшего брата Андрея Боголюбского (XIII в.), изготовленной из монолита белого мягкого известняка (обр. № 95), с отдельными пустотами по фауне.

С наружной стороны собора наиболее интенсивному разрушению подвергаются южный и западный порталы. У южного портала колонны,



Фиг. 2. Суздаль. Рождественский собор. Восточная стена у абсид, со следами морозного разрушения. Сложена известняками в нижней части и известковыми туфами в верхней части

диаметром в 15—20 см, на высоте около 1,20 м почти нацело «переедены» мучнистым выветриванием сплошного типа, которое идет со стороны колонны, обращенной к стене здания (фиг. 3). В этих местах цемент или отбит, или неплотно прилегал с самого начала, и разрушение идет с поразительной скоростью. В западном портале колонн нет, и наибольшему разрушению подвергаются угловые камни портала, примерно на той же высоте. Разрушение идет не равномерно, а с образованием глубоких, до 4—5 см, каверн, причем создается впечатление, что раз возникшая пустота продолжает усиленно развиваться, так как разрушение идет со стороны внутренних стенок (фиг. 4).

Солевых выцветов на наружных частях здания не было обнаружено, но после того как угловой блок западного портала (обр. № 227) с сильно

выраженным ячеистым выветриванием полежа в помещении музея и под-сох, он покрылся тончайшими солевыми выцветами в виде инея, что указывает на значительную насыщенность всего камня солями.

На интенсивное разрушение белокаменных порталов Рождественского собора было обращено внимание сравнительно недавно (1945 г.), что заставляет предполагать наличие резко прогрессирующего процесса разрушения.

Качественный анализ солевых выцветов дает тот же переменный состав сульфатов натрия и магния в легкорастворимой части их и смесь гипса и



Фиг. 3. Суздаль. Рождественский собор. Южный портал. Мучнистое разрушение резной колонны из известняка, местами покрытой цементной штукатуркой XI в.

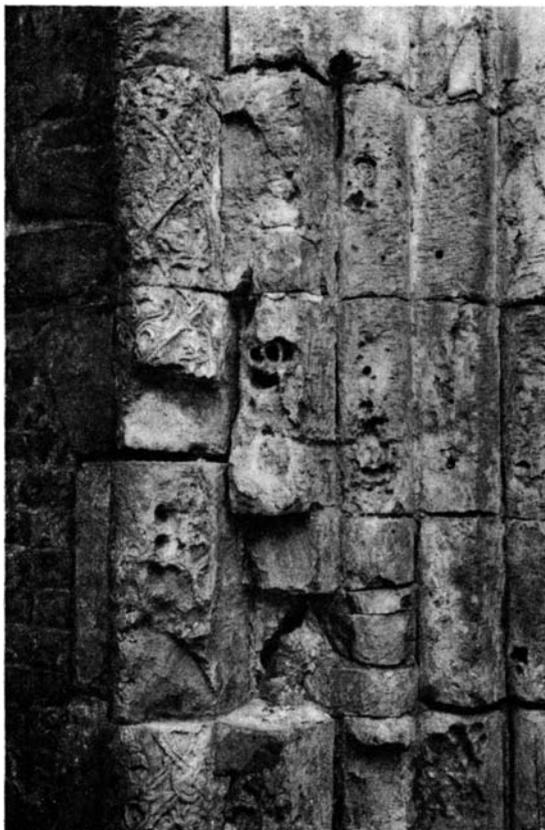
кальцита — в нерастворимой. Выцветы на штукатурке имеют слабощелочную реакцию за счет не полностью карбонатизировавшегося $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или гидролиза алюминатов натрия из цемента. В выцветах на кирпичном фундаменте престола (обр. № 224) присутствует растворимый карбонат натрия.

Церковь Бориса и Глеба в Кидекше. Построена Юрием Долгоруким на высоком берегу р. Нерли в 1152 г.

Стены церкви, имеющие толщину до 1,6 м, выложены изнутри (обр. № 100) и снаружи блочными известняками $0,5 \times 0,4 \times (0,3-0,2)$ м и заполнены бутовой кладкой. Стены заметно покороблены и выпучиваются. Камень снаружи не несет явных следов разрушений. Внутри же церкви в местах, покрытых цементной штукатуркой, при удалении последней

обнаружено разрушение поверхности камня под цементным покрытием.

В 1950 г. отмечены явные и характерные разрушения левого оконного проема в алтаре и на западном пилоне. Разрушение носит мучнистый характер, аналогичный наблюдавшемуся в Рождественском и Георгиевском соборах.



Фиг. 4. Суздаль. Рождественский собор. Кавернозное разрушение известняковой стены у западного портала

Палаты и церковь в Боголюбове (1158—1165 гг.). Древние постройки Андрея Боголюбского, сильно разрушенные монгольским нашествием, подвергались значительным позднейшим переделкам. В 1722 г. упал Дворцовый собор, на остатках которого построена в середине XVII в. современная часть собора.

От древнейших построек XII в. сохранилась на поверхности земли часть стен Дворцового собора с прилегающим переходом на полуциркульных арках и квадратная башня с каменной винтовой лестницей, которая вела через переход на хоры собора.

В западный фасад нового собора включены три резные каменные маски львов — остатки от древнего скульптурного убранства собора. На остатках древнего северного фасада, сохранившегося под аркой перехода, уцелели части первоначального аркатурного пояса. Раскопки Н. Н. Воронина в 1935—1938 гг. открыли стены древнего храма, послужившие фундаментом существующего здания. Храм имел тесаные белокаменные

порталы, из которых западный хорошо сохранился. Древние части построек сложены монолитами известняков $0,5 \times 0,4 \times (0,4-0,3)$ м хорошей сохранности (обр. № 246 из северной части храма). Исключение составляет западная стена башни, известняки которой снаружи подверглись сильному ячеистому выветриванию с образованием иногда глубоких округлых язв, до 2 см в диаметре (обр. № 239) (фиг. 5 и 6).

Зона максимального разрушения стены четко повторяет контуры чердачного помещения одной из пристроек XIX в., снесенной в 1944 г., и,



Фиг. 5. Боголюбово. Палаты Андрея Боголюбского. Западная стена. В левой верхней части стены четко видны границы прилегания крыши пристройки, снесенной при реставрации в 1944 г.

вероятнее всего, связана с совместным воздействием морозного и сульфатного выветриваний под влиянием затекавшей со стен основного здания воды, которая насыщала камень и медленно испарялась в чердачном помещении пристройки. Однако проверка этого предположения требует дополнительного, более тщательного изучения характера разрушения стены.

Раскопки южной стены вскрыли внутреннюю облицовку (обр. № 45), необычные для XII—XIII вв. круглые колонны (обр. № 48) и базы пилонов (обр. № 46 и 46а) древнего белого известняка хорошей сохранности (обр. № 47). Разрушение известняков внутри храма начинается на уровне нового пола и поднимается на 1,5—2 м над ним. Наиболее разрушаются северо-западный и северо-восточный пилоны, покрытые в XIX в. цементной штукатуркой, в тех местах, где она отстала или отбита. Там, где

в цементе имеются трещины, видно значительное развитие солевых выцветов — «ямчуги» (обр. № 245, 248), которые выделяются в этих местах и всюду сопровождают разрушение. Для характеристики интенсивности разрушения можно указать, что у основания юго-западного пилона скопилось несколько килограммов порошка разрушенного материала (обр. № 243), пропитанного солями. Солевые выцветы наблюдаются отмеченных выше двух типов: плотные, напоминающие «накипь» (обр. № 248) и нежно-игольчатые, похожие на иней. Последние появляются в первую очередь и хорошо заметны, например, на открытом раскопками западном портале,



Фиг. 6. Боголюбово. Палаты Андрея Боголюбского. Увеличенная деталь правой нижней части западной стены. Ячеистое разрушение кораллово-фораминиферового известняка неоднородного сложения, с крупными включениями остатков организмов

находящемся под крышей пристройки (обр. № 244). С наружной стороны храма на камнях, обрамляющих окна, наблюдается мучнистое выветривание, но слабо развитое.

В лестничной башне заметно активное разрушение поздней штукатурки в нижней части винтовой лестницы, в наиболее сырых ее местах.

Качественный анализ солевых выцветов устанавливает тот же типичный сульфатный характер их.

Капитель из органогенного известняка (обр. № 241), найденная при раскопке пола внутри собора, хорошо сохранилась.

Церковь Покрова-на-Нерли (1160 г.) относится к наиболее сохранившимся памятникам архитектуры. По преданию, для ее постройки сгружали одну десятую часть белого камня, который везли по р. Клязьме для других белокаменных построек Владимира. Поэтому особенно интересно детальное исследование образцов известняка, слагающего эту церковь.

Из конструктивных особенностей здания следует отметить хорошую подпольную вентиляцию, сделанную в конце XVIII — начале XIX вв. в виде кирпичных ходов, наподобие калориферов, а также кирпичный пол, сохранившийся до настоящего времени.



Фиг. 7. Церковь Покрова-на-Нерли. Южный портал. Кавернозное разрушение известняка

Кладка церкви выполнена, как и в предыдущих случаях, блоками известняка размером $(0,6-0,5) \times (0,45-0,40) \times (0,25-0,20)$ м, уложенными в два или четыре ряда, с бутовым заполнением из известкового туфа на известковом растворе.

Известняки наружной кладки южного портала и прилегающей части стены белые (обр. № 50—52) и желтоватые (обр. № 53), богатые раковинами, затронутые неравномерным кавернозным выветриванием, особенно заметным у наружного левого столба в камне с раковиной (обр. № 238), на высоте около 1,5 м от уровня земли (фиг. 7).

На наружных стенах наибольшие разрушения камня наблюдаются под водосточными трубами, которые не достигают земли на 5—8 м.

Кое-где на стенах наблюдается незначительное слоистое выветривание, при котором отслаиваются вместе с побелкой корочки камня в 2—3 мм толщиной (обр. № 250).

Известняки во внутренней кладке стен (обр. № 230, 238), пилонов (обр. № 239) и входов (обр. № 231) — обычно достаточно сохранившиеся; белые, иногда слегка желтоватые (обр. № 234, 235); в некоторых случаях они обнаруживают признаки мучнистого выветривания (западная сторона) (фиг. 8 и 9). Выветрелые известняки представлены желтоватыми породами внизу (обр. № 232, 233) и зеленовато-желтыми вверху (обр. № 228), на хорах.

У западного входа, около портала, отмечены плотные солевые выцветы и корочки отслаивания известняка (обр. № 247).



Фиг. 8. Церковь Покрова-на-Нерли. Западный портал, внутренняя сторона. Мучнистое разрушение известняков с образованием каверн, корочек отслаивания и плотных солевых выцветов

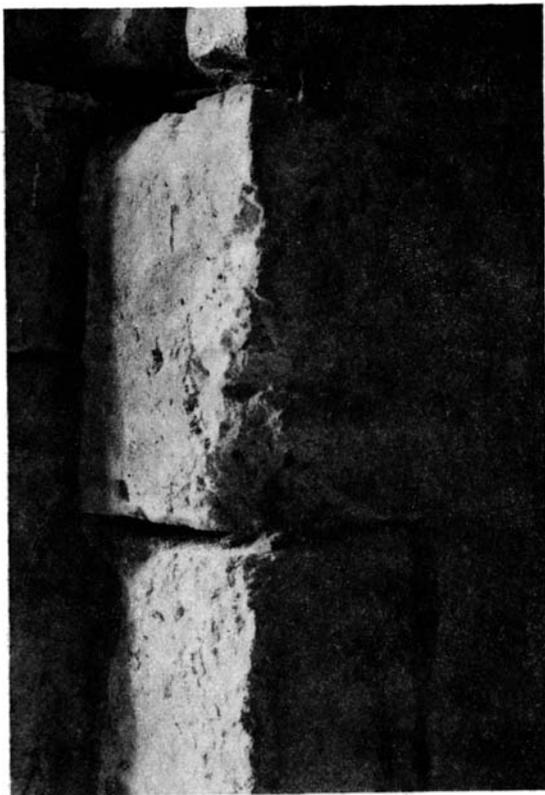
При качественном анализе растворимой части выцветов в них обнаружен преобладающий состав из сульфата магния.

Дмитриевский собор во Владимире. Стены и пилоны собора, созданного при Всеволоде в 1193—1197 гг., сложены на известковом растворе рядами тесового известняка, промежутки между которыми заняты бутовой кладкой из известнякового туфа и околос белого камня. Тесовая и бутовая кладки, составляющие до 50% объема пилонов, несут нагрузку сводов.

Неравномерность нагрузки сводов вызывает значительные механические разрушения в известняках, наблюдаемые под пятами арок (раздробление камня), а также в парусах и пилонах.

Тесовая кладка одного из пилонов (обр. № 38) отклонилась на 5—8 см от бутового заполнения (обр. № 39) и местами выгнулась, давая бочкообразное выпучивание. Каменные монолиты нарушены трещинами нагрузки: отвесными, наклонными и иногда изгибающимися, которые то приурочены к угловым частям, то переходят через ряды монолитов. Местами наблюдается отслаивание камня.

Заметному морозному разрушению подверглись расположенные возле кровли собора верхние три ряда тесового камня четверика, вероятно



Фиг. 9. То же, что и на фиг. 8

длительное время находившиеся снаружи при первоначальном позакомарном покрытии, существовавшем, согласно устному сообщению архитекторов-реставраторов (А. В. Столетов), примерно с XII по XV в.

Явление усложняется следами копоти, которые заметны по четверикам и в проемах некоторых окон купола и сопровождаются кое-где покраснением известняка. Вероятнее всего, наблюдаемые разрушения в значительной степени были вызваны действием огня при неоднократных пожарах собора.

В барабане купола наблюдается неравномерное ячеистое и мучнистое выветривание, усиливающееся снизу вверх и наиболее развитое на западной стороне купола, под местом, где, повидимому, протекает кровля купола. Разрушения, наблюдаемые в 1950 г., значительно сильнее отмеченных в 1949 г. и установлены в двух формах: 1) отслаивание корочек тол-

щиной в 1—5 мм на значительной площади (до 10 × 10 см) и 2) мучнистое выветривание с образованием отдельных «язвин». Многие из них заполнены рыхлым порошком зеленоватого цвета; возможно, что зеленоватые гнезда представляют собой более мергелистые участки, с которых и начинается выветривание.

Следы типичного разрушения, связанного с «ямчугой», имеются на пилонах и стенах алтаря, на высоте 0,5—1,5 м от пола. Известняки нижней части северо-западного пилона, желтые, богатые раковинами, подвергаются характерному мучнистому разрушению, сопровождаемому минеральными новообразованиями (обр. № 112). Минеральные новообразования развиваются как на поверхности известняков, так и в швах между камнями. Здесь собран на поверхности известняков белый, с желтым оттенком, порошок (обр. № 270), а также порошок, снятый кистью из швов вокруг большого камня (обр. № 271), и белые пушистые выделения, подобные плесени (обр. № 272), наиболее легко отделимые и растворимые. С выкрашивающейся поверхности камня взяты пленки краски и материала (обр. № 273). После удаления двухслойной масляной живописи XIX в. со стен собора было установлено, что белый камень перед нанесением на стены живописи был пропитан олифой. Установлено мучнистое разрушение камня под «кожухом» масляной живописи.

С о б о р К н я г и н и н а м о н а с т ы р я в о В л а д и м и р е, построенный в 1200—1202 гг. и заново переложенный в конце XV — начале XVI вв. и во второй половине XVII в., отмечается нами потому, что на стенах его, с внутренней стороны, по штукатурке, имеются начальные стадии типичного мучнистого разрушения.

На северной стороне собора, оштукатуренного в 1947 г., на высоте около 1,5 м видны значительные выпцеты «ямчуги», под которой выступают пятна (диаметром 2—3 см) разрушающейся штукатурки (обр. № 227). К осени 1949 г. мучнистым выветриванием был уже охвачен слой штукатурки в 2—3 мм глубиной.

В 1950 г. установлено очень резкое разрушение штукатурки, сопровождаемое типичными сульфатными выпцетами. Разрушение распространилось почти на всю оштукатуренную стену и пятна его захватывают площадь во много квадратных дециметров. На южной стене, на высоте около 4 м, происходит обильное выделение солевых выпцетов на фреске, покрывающей стену. Несомненно, что выделение солей и разрушение фрески связано с просачиванием воды через стену на уровне подтекающей крыши южного придела.

Т р о и ц к и й с о б о р в г. Александрове, законченный в 1513 г., сложен из монолитов белых известняков довольно хорошей сохранности, размером (15—20) × (20—30) × (30—40) см. Цоколь собора уходит в землю на глубину до 1 и более метров. Наибольшее разрушение, связанное, повидимому, с морозным выветриванием известняков, отмечается в цокольном камне, у границы с верхним слоем земли, и во внутренней кладке абсиды (второй от северной стены), примерно у современного уровня земли (обр. № 116а). Из белокаменной наружной кладки абсиды взят для испытания блок известняка (обр. № 116).

Обобщая все виденное нами, можно считать установленным, что в древних постройках Владимиро-Суздальской Руси преобладает особый процесс мучнистого выветривания, иногда также образующий тонкие, в 2—3 мм, корочки — отслаивания и сильно прогрессирующий в последние годы. Развивается он или пятнами, приводя к образованию глубоких каверн на поверхности камня, или захватывает значительную поверхность камен-

ного блока и приводит к сплошному мучнистому выветриванию. Различный ход процесса мучнистого выветривания зависит, вероятнее всего, от однородной или неоднородной внутренней структуры блока. Цемент, штукатурка и кирпич также подвергаются интенсивному мучнистому выветриванию, особенно опасному для штукатурок, имеющих фресковую роспись, так как фреска чрезвычайно быстро может быть уничтожена нацело. Зона наибольшего развития этого выветривания внутри здания проходит на высоте 0,5—1,5 м от уровня пола и сопровождается сульфатными солевыми выцветами, так называемой «ямчугой», появление которой служит предвестником наступающего разрыхления материала.

В наружных частях здания поражаются главным образом порталы в угловых камнях и местах, укрытых от непосредственного воздействия воды, достигая максимума также на высоте 1,0—1,5 м от уровня земли (фиг. 8 и 9). Разрушение развивается также в проемах окон, но обычно в меньшей степени (повидимому, также в тех местах, которые не подвергаются обмывающему действию дождевой воды).

Здесь на процесс мучнистого выветривания, вероятно, накладывается процесс морозного выветривания, что усложняет картину разрушения.

Солевые выцветы в наружных частях здания нами при непосредственном осмотре обнаружены не были, но появление их на разрушающихся блоках камня при подсыхании в лаборатории указывает на значительное накопление сульфатов в камне.

В разных местах можно последовательно наблюдать всю картину мучнистого выветривания — от появления тончайших игольчатых кристаллов «ямчуги» на стенах собора Княгинина монастыря во Владимире и западном портале церкви в Боголюбове до почти полного разрушения колонн и блоков порталов в Суздале и камней северо-западного пилона Георгиевского собора в Юрьеве-Польском¹.

В настоящее время именно этот процесс разрушения идет наиболее интенсивно и наиболее опасен для сохранности здания. Лабораторное изучение позволяет считать его с полной достоверностью разновидностью сульфатного выветривания, широко распространенного как в природе, так и в сооружениях различных стран и эпох.

Способы борьбы с сульфатным выветриванием недостаточно ясны и могут быть намечены только после характеристики его сущности.

Наблюдая сравнительную устойчивость различных материалов, можно указать, что в кирпичных строениях кирпич обычно разрушается ранее известкового связующего раствора, который выступает на фоне разрушающегося кирпича; в белокаменных же постройках разрушается в первую очередь известковое связующее. Таким образом, известняк оказывается наиболее устойчивым из этих трех материалов.

Следует отметить, что В. Н. Юнг (1949), изучавший древнерусские строительные растворы многих сооружений, в том числе и Дмитриевского собора во Владимире, отмечает высокое качество древних растворов и умение древних строителей подбирать надлежащие пропорции различных наполнителей в зависимости от особенностей и степени пластичности вяжущего. Он указывает на высокое качество растворов с карбонатным наполнителем из мелких и мельчайших зерен известняка.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУЛЬФАТНОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

Сильное разрушающее действие сульфата натрия на строительные материалы известно настолько хорошо, что насыщение им применяется как один из ускоренных методов определения устойчивости породы.

¹ Мы не приводим описания многочисленных разрушений старинных кирпичных построек, которые также сопровождаются выцветами и широко развиты во Владимире и Суздале. Несомненно, что они вызываются общей причиной.

Мы считаем, что явления, которые происходят в породе, насыщенной сульфатом натрия, резко отличаются от явлений, происходящих при обычном замораживании образцов.

Методика испытания морозоустойчивости породы с сульфатом натрия основывается на неправильном представлении о том, что разрушение породы в обоих случаях вызывается так называемым кристаллизационным давлением растущих кристаллов сульфата натрия или чистого льда. Можно утверждать, что давление растущих из водных растворов кристаллов вообще настолько мало, что часто не может даже отодвинуть крупные песчинки, мешающие росту кристалла, и обычно не превышает граммов на квадратный сантиметр.

Истинное давление, которое может произвести нормально растущий кристалл на стенки сосуда, в котором он растет, определяется суммой поверхностных натяжений кристалл — жидкость и жидкость — сосуд. Это давление также обычно не достигает значительной величины. Характерно, что хлориды, нитраты и некоторые другие соли не оказывают значительного разрушающего действия, столь типичного для сульфатов. Это заставляет предположить, что действие сульфатов связано с другим явлением, а не с обычным «кристаллизационным давлением» солей.

Одно из характерных физико-химических свойств сульфатов натрия и магния — это способность к образованию различных кристаллогидратов с разным количеством кристаллизационной воды и разным молекулярным объемом в зависимости от условий образования. Переход одной модификации соли в другую происходит непосредственно в твердой фазе и сопровождается резким изменением общего объема соли.

Этот переход в основном зависит от температуры и упругости водяных паров (влажности) воздуха и сопровождается весьма значительными давлениями на стенки сосуда, так как явления текучести здесь почти устраняются и нейтрализовать давление могут лишь явления скольжения в кристаллическом веществе, требующие значительных усилий.

Вследствие того, что переход ряда кристаллогидратов один в другой происходит при обычных для природных условий колебаниях температуры и влажности воздуха, даже в течение одного дня, пористое тело, пропитанное сульфатами, может постоянно испытывать переменное внутреннее напряжение, ведущее к его разрушению.

Наиболее опасным солевым составом, вызывающим разрушение, является именно комбинация сульфатов натрия и магния, которая присутствует в солевых выцветах старинных построек (табл. 1). Фазовые диаграммы этих солей изучены, но весьма сложны, и мы не будем их приводить полностью, однако дадим несколько типичных примеров зависимости от внешних условий.

Сульфат натрия в обычных условиях кристаллизуется из воды при температуре от $1^{\circ},47$ до $32^{\circ},4$ в виде глауберовой соли (мирабилит) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; выше $32^{\circ},4$ происходит кристаллизация безводного тенардита Na_2SO_4 . Если наряду с сульфатом натрия присутствует сульфат магния, кристаллизация тенардита может начинаться с 25° , а если одновременно присутствуют и хлориды, то уже с 15° .

Рассматривая табл. 1, показывающую основной состав некоторых солевых выцветов, можно видеть значительное непостоянство его, которое обусловлено процессами дробной кристаллизации в разных условиях. Состав выцветов, собранных в 1950 г. на тех же местах, частично отличается от вышеуказанного по преобладанию других компонентов. На механизме дробной кристаллизации мы не можем здесь остановиваться.

Переход одной соли в другую, сопровождаемый увеличением объема в 4,13 раза, показывают данные табл. 2, характеризующие условия равновесия глауберовой соли с водяным паром при разных температурах. Таким

Результаты качественного анализа солевых выцветов на стенах старинных белокаменных построек
(основной состав, 1949 г.)

№ обр.	Памятник архитектуры	Место взятия	SO ₄ ^{''}	Cl'	Na'	Mg''	Примечания
210	Георгиевский собор	Северо-западный пилон	+	—	—	+	1
211	» »	То же	+	—	+	+	1
212	» »	» »	+	—	+	+	1
213	» »	» »	+	—	+	+	1
215	» »	Портал гробницы Святослава	+	—	—	+	
219	Электростанция в Юрьеве-Польском	Подвал	+	—	+	—	1,2
223	Собор в Суздале	Северная стена	+	Следы	+	Следы	
224	» »	Пол в алтаре	+	—	Следы	+	
225	» »	У гробницы	+	—	+	+	1,3
226	» »	Алтарь	+	—	+	—	1,2
227	Княгинин монастырь	Северная стена	+	—	+	+	1,2
247	Покров-на-Нерли	Западный портал	+	—	—	+	
247a	Боголюбиво	» »	+	—	+	—	
249	»	Восточная стена	+	—	+	+	1

Пояснения к примечанию: 1 — в нерастворимой части CaCO₃ и CaSO₄; 2 — щелочная реакция Na₂CO₃ и Ca(OH)₂; 3 — в растворимой части CO₂.

образом, переход тенардита в мирабилит путем поглощения водяных паров из воздуха или обратный процесс будет происходить в пределах 0—30° при относительной влажности воздуха в 61—82%.

Таблица 2

Условия равновесия мирабилита с водяным паром

Температура (в °C)	Равновесное давление паров (в мм ртутного столба)	Соответствующая относительная влажность воздуха (в %)
0	2,6	61,0
9	5,24	61,0
20	12,2	71,5
23	15,7	74,7
24,1	17,0	75,6
25	18,1	76,0
27	21,0	78,6
31	27,9	82,8

Аналогичные условия перехода известны и для сульфатов магния (табл. 3).

Так, из водного раствора между —3° и +1° кристаллизуется MgSO₄ · 12H₂O, между +1 и 48° — эпсомит MgSO₄ · 7H₂O, между 48 и 68° —

Условия равновесия кристаллогидратов сульфата магния с водяным паром

Температура (в °С)	MgSO ₄ ·7H ₂ O		MgSO ₄ ·6H ₂ O		MgSO ₄ ·5H ₂ O		MgSO ₄ ·4H ₂ O	
	высота ртутного столба (в мм)	влажность воздуха (в %)						
14,98	4,87	38	—	—	—	—	—	—
20,05	7,58	43,2	—	—	—	—	—	—
25,0	11,5—	49,3—	9,8	41,9	8,8	37	4,9	20,6
32,40	12,7	53,4	15,95	44,3	12,8	36	7,19	21,1
	20,0— 22,3	56,2— 63,5						

гексагидрит MgSO₄ · 6H₂O и выше этого — кизерит MgSO₄ · H₂O. Известны и другие гидраты.

Другие соли, находящиеся в растворе, понижают температуру образования этих кристаллогидратов. В присутствии хлоридов гексагидрит кристаллизуется уже с 30° и кизерит — с 35°,5.

В каменной кладке в подавляющем большинстве случаев должен выделяться эпсомит (рейхардит), но не исключена возможность его перехода в другие кристаллогидраты.

Совместное присутствие сульфатов натрия и магния может привести к образованию также ряда двойных солей, которые легко переходят одна в другую или распадаются на составные компоненты при изменении окружающих условий.

Так, астраханит MgSO₄ · Na₂SO₄ · 4H₂O, выпадающий из чистых растворов при температуре выше 20°,5, в присутствии хлоридов может начать образовываться уже с 5°.

При избытке воды астраханит ниже 20°,5 разлагается с образованием мирабилита и эпсомита, что сопровождается увеличением объема в 2,5 раза (табл. 4).

Таблица 4

Увеличение объема при разложении астраханита

Соединение	Удельный вес	Молекулярный вес	Молекулярный объем
Астраханит	2,232	334,46	150,0
Мирабилит	1,462	322,25	220,5)
Эпсомит	2,691	246,52	145,9)
			366,4

Данных примеров достаточно, чтобы показать всю сложность возможных взаимных переходов сульфатов даже при условии чистых солей. Фактически эта картина резко усложняется от присутствия не учтенных здесь примесей и некоторых побочных процессов. Так, например, из насыщенного раствора сульфата магния (содержащего ионы кальция) может выделяться сульфат кальция в виде ангидрита CaSO₄ или полугидрата, который при поступлении воды будет превращаться, с увеличением объема, в гипс CaSO₄ · 2H₂O, и т. п. Однако этот последний процесс имеет очень подчиненное значение и не требует специального рассмотрения.

Наряду с механическим воздействием сульфатов может происходить взаимодействие иона серной кислоты и карбонатной породы, в результате которого также будет иметь место увеличение объема.

Так, CaCO_3 при переходе в $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ увеличивается в объеме на 100%, MgCO_3 при переходе в $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — на 430%, Al_2O_3 при переходе в $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ — на 1400% и т. д.

В бетонах при воздействии сульфатной воды при содержании в ней SO_4^{2-} более 250 мг/л может образоваться так называемая «цементная бацилла», представляющая собой сульфоалюминат кальция, который на воздухе распадается в смесь гипса, CaCO_3 и Al_2O_3 и разрушает бетон чрезвычайно быстро.

Следует, однако, оговорить, что для нормального хода этих реакций необходимо присутствие свободной серной кислоты или постоянное удаление возникающих продуктов реакции. При отсутствии этих условий реакция, например образования гипсов из известняка под воздействием раствора Na_2SO_4 , идет очень слабо, так как в реакции $\text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{CaSO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ равновесие сильно смещено в сторону образования карбоната кальция. Отношение ионов следующее:

$$\frac{(\text{CO}_3)^{2-}}{(\text{SO}_4)^{2-}} = 1,56 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, наибольшее разрушающее воздействие при сульфатном выветривании в отсутствии значительных количеств свободной серной кислоты происходит в результате взаимного перехода друг в друга различных кристаллогидратов сульфатов натрия и магния и их двойных солей, могущих давать неустойчивые формы при обычных условиях температуры и влажности воздуха.

Количественные анализы продуктов сульфатного выветривания (корочек, муки и выцветов), проведенные разными исследователями, показывают присутствие в этих продуктах небольших количеств азотсодержащих соединений.

Указанное явление, которое изучено еще совершенно недостаточно, заставляет предполагать возможность участия в этом процессе биохимических факторов. К сожалению, вследствие недостаточной изученности биологического выветривания и противоречивых литературных данных по этому вопросу, делать определенные выводы пока преждевременно, и надо лишь высказать пожелание о практической необходимости изучения его.

Однако нам представляется несомненным, что биологический процесс в той или иной степени накладывается на физико-химический и усложняет его течение. Несмотря на это, основные выводы о характере физико-химического процесса остаются в силе, и, возможно, впоследствии потребуются лишь незначительные поправки к показанному здесь пути разрушающего воздействия этих процессов.

В лабораторных условиях нами были поставлены опыты по воспроизведению сульфатного выветривания известняков. Эти опыты показали весьма сильное разрушающее действие сульфатов натрия и магния, а также их смесей.

Опыты производились над призмами известняков сечением 1×1 см и длиной 10 см. Призмы одним концом погружали в крепкие растворы Na_2SO_4 , MgSO_4 , смеси $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$, а также NaCl , Na_2CO_3 и NaHCO_3 . После капиллярного насыщения образцов соответствующим раствором, призмы высушивали в эксикаторе над крепкой серной кислотой (при комнатной температуре). Затем часть из них для увлажнения помещали в эксикатор над чистой водой, а другую часть вторично подвергали капиллярному насыщению раствором.

И в том, и в другом случае разрушение образцов иногда начиналось уже к концу первого цикла, резко прогрессируя во втором и третьем циклах в случае насыщения растворами Na_2SO_4 , MgSO_4 и смеси $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$.

При воздействии на призмы известняков растворов NaCl и Na_2CO_3 наблюдались лишь незначительные выкрашивания образцов, раствор же NaHCO_3 вызывал значительные разрушения известняка, лишь немного более слабые, чем это производили сульфаты.

При действии 5%-ных растворов указанных солей большая часть их успевает выкристаллизоваться на поверхности образца при его высушивании и заметного разрушения в течение 5 циклов не производит.

Таким образом, в зависимости от скорости высыхания и насыщенности пропитывающего образец раствора, можно наблюдать четыре случая разрушения:

1. При малой концентрации солевого раствора и медленном испарении его соли целиком выкристаллизовываются на поверхности образца и не вызывают внутренних напряжений в камне при последующей гидратации их.

2. При средней концентрации разрушение происходит в самом верхнем слое и приводит к мучнистому выветриванию его с поверхности.

3. При более высокой скорости испарения основная масса солей выкристаллизовывается на незначительной глубине (2—3 мм) от поверхности образца и приводит к отслаиванию корочек известняка с поверхности.

4. При высокой концентрации солей разрушение образца происходит по всей его массе и приводит к растрескиванию или сплошному нарушению структуры без образования четко выраженных корочек.

Последний случай в наших опытах не наблюдался. Он, вероятно, имеет место не при гидратации солей с поверхности, а при резком переходе всей массы соли в другие соединения в связи с изменением температуры образца, например, в связи с замораживанием насыщенного раствором образцов.

Наиболее распространены второй и третий случаи, дающие формы разрушения, очень близко напоминающие наблюдаемые в природных условиях.

ОБ ИСТОЧНИКАХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ СУЛЬФАТОВ В СТАРИННЫХ ЗДАНИЯХ

Возможны три источника происхождения сульфатов, в той или иной степени способствующие возникновению сульфатного выветривания в известняках, слагающих белокаменные постройки.

1. Сульфаты находятся в самом известняке или доломите в виде, например, гипса или вновь образуются в нем за счет окисления пирита.

2. Сульфаты образуются за счет сернистого ангидрида, находящегося в воздухе.

3. Сульфаты поступают в тело камня в результате капиллярного подсоса грунтовых вод, содержащих сульфаты.

1

Отдельные кристаллы гипса и пирита довольно часто встречаются в доломитах, но сравнительно редки в известняках. Так, по Кларку, среднее содержание серы в 345 образцах различных известняков в виде SO_3 —0,05% и в виде иона S'' — 0,09%. По М. С. Швецову, в 498 образцах известняков, применяемых для строительных целей, среднее содержание SO_3 — 0,07% и S'' — 0,07%. Значительная часть этой серы входит в трудно-растворимые, сравнительно устойчивые минералы. Она может принять

участие в образовании подвижных сульфатов лишь в небольшой мере, хотя общее ее количество вполне достаточно для образования обогащенной сульфатами поверхностной зоны. Действительно, при наличии в породе 0,05% SO_3 1 м³ породы будет содержать 1 кг SO_3 .

Если толщина стены сооружения — 1 м, то даже при отсутствии приноса солей с соседних участков, под влиянием капиллярного вышотевания в тонкой поверхностной зоне стены на площади в 1 м² может сконцентрироваться более 1 кг солей, что совершенно достаточно для того, чтобы вызвать усиленное разрушение стены с поверхности.

Еще большее количество сульфатов может образоваться при разложении сернистых соединений, содержащихся в породе. Анализы древних известковых растворов, проведенные В. Н. Юнгом (1949), всегда показывали повышенное содержание SO_3 в них, что В. Н. Юнг относит за счет разложения пирита, содержащегося в этих растворах. Последнее представляется нам маловероятным.

В табл. 5 приведены анализы только древних известковых растворов, не имеющих в своем составе алебаstra. Под растворимой частью пони-

Таблица 5

Содержание SO_3 в древних известковых строительных растворах
(по В. Н. Юнгу, 1949; аналитик В. В. Мышляева)

Сооружение	Время постройки (век)	SO_3 (в %)	Примечание
Борисоглебский собор, Смоленск . . .	XI	1,48	—
Софийский собор, Полоцк	XII	5,52	—
Дмитриевский собор, Владимир . . .	XII	0,28	—
То же	XII	0,40	В солянокислой 5%-ной вытяжке
Крепостное сооружение, Ивангород	XV	1,86	—
То же	XV	4,32	В растворимой части
» »	XV	Нет	В нерастворимом остатке (наполнитель)
Колокольня собора, Ивангород . . .	XVII	1,13	—
То же	XVII	5,39	В растворимой части
» »	XVII	нет	В нерастворимом остатке (наполнитель)
Подвал собора, Ивангород	XVII	1,60	—
То же	XVII	1,89	В растворимой части
Крепость, Ивангород	XVII	2,31	—
То же	XVII	2,88	В растворимой части
Среднее		2,02	
Среднее в растворимой части		2,88	

мается часть, растворимая в 5%-ной соляной кислоте, т. е. часть, заключающая в себе собственно вяжущее и карбонатную часть наполнителя. Некарбонатного наполнителя SO_3 не содержит.

Таким образом, мы видим во всех случаях анализа древних известковых растворов обогащение их SO_3 в несколько десятков раз по сравнению со средним содержанием его в исходном известняке. К сожалению, нам неизвестны условия взятия этих образцов.

Известняки в изучаемых нами сооружениях также обнаруживают значительное обогащение сульфатами, что явствует из наблюдаемых на них сульфатных солевых выцветов, выступающих во многих местах.

Количественный анализ этого явления представляет интерес при условии определения сульфатов в разных участках стены сооружения — в образцах, взятых на разных расстояниях от поверхности стены и в различных местах по высоте ее.

Во всяком случае, несомненно резкое обогащение сульфатами отдельных участков сооружения, которое связано с передвижением капиллярных растворов и резким перераспределением средней равномерной примеси SO_2 в известняковых блоках. Анализ этого явления будет дан ниже, при описании действия грунтовых вод.

Некоторыми исследователями высказывалось предположение, что наряду с такими источниками сульфатов, как гипс и пирит, значительное количество серы может быть связано с составом первоначальной «горной влажности», находящейся в известняках в законсервированном виде и в какой-то степени отражающей состав воды, из которой образовались известняки. В ней сульфаты могли находиться в легкорастворимой форме, облегчающей их миграцию. Однако, прежде всего, второе положение исключает первое, т. е. если вода «законсервирована», то она почти неспособна к миграции и, кроме того, анализы воды, отжатой под высоким давлением из разных осадочных пород (известняков и глин) Н. А. Крюковым и Е. В. Палей-Ренгартен, не показали существенного отличия в составах «горной влажности» и грунтовых вод (Крюков, Бунеев и Палей-Ренгартен, 1947). Так, верхнекарбонный известняк из шахты метро «Таганская площадь», с общей влажностью около 9%, был отжат до остаточной влажности 2—3%, и вода, полученная при этом, имела константу электропроводности $1,351 \cdot 10^{-3}$ ома/см³ при рН = 7,70 — 8,20, что соответствует общему содержанию солей около 1,80 г/л. Частичный количественный анализ показал содержание Cl^- 3—5 мг/экв. на 1 л и HCO_3^- — 4,85 мг/экв. на 1 л, что соответствует около 107—171 мг/л Cl^- и около 171 мг/л HCO_3^- , т. е. вода эта относится к пресным водам с незначительно повышенной минерализацией.

2

Сернистый ангидрид является постоянной составной частью воздуха и при определенных условиях может окисляться до серного ангидрида с образованием серной кислоты. Особенно резко количество SO_2 возросло в воздухе городов за последние 80 лет, что связано с широким внедрением в промышленность каменного угля как топлива.

Некоторое представление о роли SO_2 как возможного агента выветривания можно получить по следующим цифрам: по данным П. Н. Палея и Л. С. Селиванова, содержание S в воздухе (в γ/m^3) колеблется для Москвы от 0 до 423 и для Болшева — от 0 до 156. Средние числа за два года дают содержание S для Москвы 194 γ и для Болшева 94 γ на 1 м³ воздуха (см. табл. 6).

Таблица 6
Среднее содержание S в воздухе (в γ/m^3)

Время наблюдения	Москва	Болшево	Сен-Луис	Лондон
Зима	238	71	382	590
Лето	49	126	163	120
Среднее за год . . .	149	94	273	355

Максимальную цифру дает Чикаго, где в декабре 1937 г. содержание серы в воздухе доходило до 4630 $\gamma/\text{м}^3$.

При анализе этих данных необходимо помнить, что они могут значительно меняться, в зависимости от господствующего направления ветра.

По данным б. Наркомата тяжелой промышленности («Правда» от 17 мая 1937 г., № 134), из дымовых газов только Московской обл. может быть получено до 500 000 т серной кислоты в год. В Вене, по Хислинггеру, ежегодно осаждается до 78 000 т серной кислоты, а в Париже 8 млн. т сжигаемого угля дает около 200 000 т серной кислоты.

Процесс образования сульфатной корочки выветривания на известняках отмечался неоднократно для многих сооружений (см., например, Беликов, 1950). Характерна для этого процесса непосредственная реакция карбоната кальция с вносимой в виде пара серной кислотой, с образованием гипса:



На поверхности при этом никаких выцветов не образуется, а появляется или уплотненная, потом отваливающаяся корочка, обогащенная гипсом, или сплошное «матовое» разрушение, хорошо заметное на мраморах.

Образование при этом процессе легкорастворимых сульфатов в известняке маловероятно вследствие недостатка щелочей.

В разрушениях владими́ро-суздальских построек этот процесс играет лишь второстепенную роль.

Интересно было бы изучить значение этого процесса в разрушении московских белокаменных построек, находящихся в значительно худших условиях.

3

Поступление сульфатов в тело камня за счет капиллярного подсоса грунтовых вод также, безусловно, происходит при сульфатном выветривании. Грунтовые воды Подмосковной котловины, так же как и речные воды системы рр. Волги, Оки и Клязьмы, характеризуются резким преобладанием содержания сульфатов над хлоридами.

Приводим некоторые анализы речных и колодезных вод, иллюстрирующие это явление для интересующего нас района (табл. 7).

Среднее отношение $\text{SO}_3:\text{Cl}$ на основании 25 случайных анализов получается близким к 4,3; это вполне вероятная цифра, если учесть, что среднее отношение $\text{SO}_3:\text{Cl}$ в рр. Москве, Оке, Волге и Клязьме также близко к 4,1.

Таким образом, солевой остаток этих вод, не считая карбонатной части, в основном носит сульфатный характер.

Соотношение ионов в водной вытяжке из разрушенного до порошка известняка, взятого с юго-восточного пилона церкви в с. Боголюбово (обр. № 243), характеризуется следующими цифрами (в г на 1 часть хлорид-иона):

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ [']	Cl [']	CO ₃ [']	HCO ₃ [']	Na ⁺ + K ⁺	SO ₃ :Cl
0,62	2,59	7,86	1,00	0,83	1,71	Не опр.	6,54

Отношение $\text{SO}_3:\text{Cl}$, равное 6,54, близко к таковому в водах этой провинции.

Типичное местоположение максимума сульфатного разрушения в старинных зданиях, как уже указывалось, находится или на высоте 0,5—1,5 м от уровня пола внутри здания, или приблизительно на той же высоте на угловых камнях порталов сооружения снаружи здания¹.

¹ В исключительно дождливое лето 1950 г. отмечено некоторое передвижение зоны максимального разрушения камня кверху.

Содержание сульфатов и хлоридов (в мг/л) в некоторых пресных водах Подмосковной котловины

Место взятия пробы	Cl	SO ₄	SO ₄ : Cl
Владимир, р. Клязьма	2,9	5,6	1,9
Щербаков р. Волга	2,4	12,5	5,2
Александров, колодец	13,2	6,2	0,45
Шуя, р. Теза	5,85	9,3	1,6
Юрвец, колодец	2,00	12,0	6,0
Ржев, р. Холынка	9,34	21,5	2,3
Кашин, р. Кашинка	3,7	6,1	1,6
Бежецк, р. Остреч	2,4	4,0	1,7
Ярославль, водопровод	9,0	24,7	2,7
Владимир, колодец при больнице	51,4	89,2	1,7
Владимир, колодец у р. Лыбедь	84,8	111,2	1,3
Москва, буровой колодец № 2	7,0	80,5	11,5
» » » № 3	6,3	145,3	23,0
» » » № 1	84,5	109,2	1,3
» » » № 5	8,8	149,2	1,7
Александров, р. Серая	7,3	5,6	0,8
Курск, водопровод	5,6	23,7	4,2
Касимов, р. Ока	5,8	18,12	3,1
Владимир, буровой колодец	80,5	1226,2	15,3
Щербаков, буровой колодец	252,8	694,8	2,8
Углич, буровой колодец	605,0	1717,0	2,8
Москва, Рублево (средние данные)	2,1	4,6	2,2
Ока, с. Протопопово (средние данные)	2,6	24,9	9,6
Волга, у р. Можы (средние данные)	1,7	3,1	1,8
Клязьма, в пределах Московской обл. (средние данные)	2,8	8,1	2,9
Среднее	—	—	4,3

В верхних частях сооружения данный тип выветривания обычно выражен очень слабо¹. Это указывает на концентрацию солей, связанную с капиллярным подсосом воды из почвы, в то время как конденсационная вода и вода, проникающая через неплотности крыши и просачивающаяся через стену сверху вниз, обычно не оказывает равномерного и многолетнего воздействия.

Определение дифференциальной пористости мячковского известняка типа «красненький», широко использовавшегося в старых постройках, дало приблизительно такую картину, которую можно считать довольно типичной:

Средний эффективный по капиллярности диаметр пор	около 0,10—0,15 мм
Колебания в диаметре пор при определении под микроскопом	0,02—0,2 (0,6) мм
Средний диаметр пор под микроскопом	0,1 мм
Поры с диаметром более 0,02 мм занимают	около 47% общей пористости
Поры с диаметром 0,01—0,0002 мм занимают	около 40% общей пористости
Поры с диаметром менее 0,0002 мм занимают	около 13% общей пористости

¹ Заметное разрушение отмечено в куполе Дмитриевского собора во Владимире и в церкви Княгинина монастыря на высоте около 4 м.

При отсутствии испарения общее количество воды в стене, сложенной таким известняком, при капиллярном подсосе снизу распределяется таким образом:

Ниже 1,5 м будет находиться	около 60% воды
Между 1,5 и 15 м будет находиться . . .	около 32% »

Около 8% воды будет пропитывать стену на высоте более 15 м. При этом средняя эффективная по скорости поднятия высота смачивания будет около 20—30 см.

Подавляющая масса всей влаги, могущая передвигаться с более или менее значительной скоростью, будет находиться на высоте от 20 см до 1,5 м от уровня воды, а скорость поднятия «фронта» капиллярной воды выше 1,5 м будет невелика.

Если мы введем весьма значительную поправку на испарение воды, поступающей в камень, то разница в степени насыщения разных по высоте зон камня выявится еще резче. Зона максимального выделения солевых выцветов на поверхности камня будет определяться известной равнодействующей между миграцией воды к поверхности за счет испарения и капиллярным подсосом ее вверх.

При колеблющемся уровне грунтовых вод можно ожидать, что наибольшее накопление солей будет связано с наивысшим уровнем воды, так как при этом все образовавшиеся в более низких зонах соли будут растворяться и перемещаться вверх в виде концентрированных растворов.

Хорошее совпадение теоретических предпосылок с наблюдаемым на практике местом накопления сульфатов в старинных зданиях позволяет считать установленным, что основное накопление сульфатов происходит за счет капиллярного подтягивания воды из почвы. Первоначальное образование сульфатов может идти всеми тремя рассмотренными путями, но наиболее вероятным остается третий процесс — привнос сульфатов грунтовыми водами. При этом становится понятной преобладающая роль ионов натрия и магния, которыми богаты эти воды.

Таким образом, старинное здание является как бы типом солончака, в котором процессы испарения воды преобладают над процессами промывания почвы и стен атмосферными осадками, вследствие чего происходит вековое засоление части грунта, находящегося под крышей, и поверхности стен, которая также защищена от прямого обмывания водою.

Разрушение начинается с наиболее пористых участков стены, обеспечивающих повышение испарения и подтягивание солевых растворов к этому месту. Такими местами обычно являются швы между камнями, заполненные сравнительно рыхлым связующим, которое и разрушается в первую очередь. С увеличением поверхности испарения, вызванным частичным выкрашиванием, процесс становится еще более направленным и его течение ускоряется.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- Александров А. И. Образование налетов солей в штукатурке. Строит. пром. 1934, № 10.
- Бауэр А. А. Владимирский край. Естественно-исторический и культурно-экономический очерк. Тр. Влад. губ. научн. общ. по изуч. местного края, 1921, вып. 2.
- Беликов Б. П. Наблюдения над выветриванием мраморной облицовки Музея изобразительных искусств имени Пушкина в Москве. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1950, вып. 122, петрогр. сер., № 37.
- Бережков Д. Н. О храмах Владимиро-Суздальского княжества XII—XIII вв. Влад. учен. архивн. комиссия, 1903, вып. 5.
- Бобринский А. Резной камень в России. М., 1946.
- Боклевский П. П. Некоторые каменоломни Владимирской губернии. Горн. журн., 1888, № 9.

- В а р г а н о в А. А. Суздаль. Изд-во Акад. архит. СССР, 1949.
- В о р о н и н Н. Н. Очерки по истории русского зодчества в XVI—XVII вв. Л., 1934.
- В о р о н и н Н. Н. Памятники русской архитектуры. М., Изд-во Акад. архит. СССР, 1944.
- В о р о н и н Н. Н. 1. Древнерусские города. Изд-во Акад. Наук СССР, 1945.
- В о р о н и н Н. Н. 2. Памятники владими́ро-суздальского зодчества XI—XII веков. М., 1945.
- В о р о н и н Н. Н. 3. Сокровища русского зодчества. Владимир. М., Изд. Акад. архит. СССР, 1945.
- В о р о н и н Н. Н. Владимир. М., Изд-во Акад. архит. СССР, 1948.
- Г е о р г и е в с к и й В. Город Владимир на Клязьме и его достопримечательности. Владимир, 1896.
- Г р а б а р ь И. Э. История русского искусства, тт. 1—5. М., 1909.
- Д е м е н т ь е в Г. К. Характер образования налетов солей на поверхности портландцементного раствора в связи с разрушением штукатурки и окраски. Строит. пром., 1926, № 9.
- Д о б р о х о т о в В. Древний Боголюблов город и монастырь с его окрестностями. М., 1852.
- Д о с т о в с к и й М. Суздаль. Под ред. И. Н. Бороздина. Культурные сокровища России, вып. 14, 1918.
- З а б е л и н И. Е. История Москвы. М., 1905.
- З а л е с с к и й Б. В., С т е п а н о в В. Я. и Ф л о р е н с к и й К. П. Опыт изучения физических свойств известняков мячковского горизонта (Мячковская группа месторождений). Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1950, вып. 121, петрогр. сер., № 36.
- З а л е с с к и й Б. В. и Ф л о р е н с к и й К. П. О некоторых основных предпосылках испытаний каменных строительных материалов на морозоустойчивость. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1952, вып. 146, петрогр. сер., № 42.
- З а х а р о в А. А. Белизна кирпича и растворов. Строит. матер., 1939, № 3.
- История культуры древней Руси т. 2. Изд-во Акад. Наук СССР, 1951.
- К о в е л ь м а н И. А. Болезни облицовки и отделки зданий. Изд-во Всес. акад. архит., 1939.
- К о н д а к о в Н. П. и Т о л с т о й И. Русские древности, вып. 6. СПб., 1899.
- К р ю к о в Н. А., Б у н е е в Н. А. и П а л е й - Р е н г а р т е н Е. В. Опыт отжигания растворов из осадочных горных пород. Докл. Акад. Наук СССР, 1947, № 7.
- М а с а н о в И. Библиография Владимирской губернии, т. 1. Владимир, 1905. Прилож. к вып. 7. Тр. Влад. учен. арх. комиссии.
- Материалы по археологии древнерусских городов, т. 1, Изд-во. Акад. Наук СССР, 1949 (Матер. и исслед. по археологии СССР, № 11) Реф. вестн. Акад. Наук СССР, 1950, № 4.
- П а в л и н о в А. М. История русской архитектуры, 1894.
- По замечательным местам Поволжья. Поездки по Казанской губернии и к Болгарским развалинам. Казань, 1896.
- Памятники древнего русского зодчества. СПб., Изд-во Акад. художеств, 1901.
- Р и х т е р Ф. Ф. Памятники древнерусского зодчества. М., 1851—1856.
- Р о м а н о в К. К. Георгиевский собор в Юрьеве-Польском. Изв. Археол. комиссий, 1909, вып. 36.
- Россия. Полное географическое описание нашего отечества, т. 1. СПб., 1899.
- С м и р н о в А. П. Доклад о работах по археологическому изучению города Булгара на Волге с 1938 по 1947 гг. Изв. Акад. Наук СССР, Отд. истории и филос., 5, № 3.
- С п е р а н с к и й А. Очерки по истории приказов каменных дел Московского государства.
- У ш а к о в Н. Н. Спутник по древним памятникам и городам Владимирской губернии. Владимир, 1913.
- Труды Первого археологического съезда. М., Изд-во Моск. археол. об-ва., 1880.
- Ф е р с м а н А. Е. Из истории культуры камня в России. Изд-во Акад. Наук СССР, 1946.
- Ш в е ц о в М. С. Петрография осадочных пород. М., Гостеолиздат, 1948.
- Ю н г В. Н. О древнерусских строительных растворах. Сборник научных работ по вяжущим материалам. М., Гос. изд-во литерат. по строит. матер., 1949.

Ю. А. РОЗАНОВ

ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗВЕСТНЯКОВ ОТ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ СТРУКТУРЫ

При исследовании известняков нижнего карбона Подмосковья, произведенном автором настоящей статьи в 1950 г., среди других месторождений было осмотрено Митинское месторождение, расположенное на правом берегу р. Оки, близ дер. Митино Заокского района Тульской области.

Проводившиеся в это время на месторождении разведочные работы позволили собрать материалы для достаточно полного изучения петрографических особенностей и физико-механических свойств толщ пород, вскрытой разведочными выработками.

Митинское месторождение приурочено к верхней части мощной толщи карбонатных пород верхов окского и низов серпуховского ярусов нижнего карбона. В пределах месторождения вскрыты сверху вниз следующие породы:

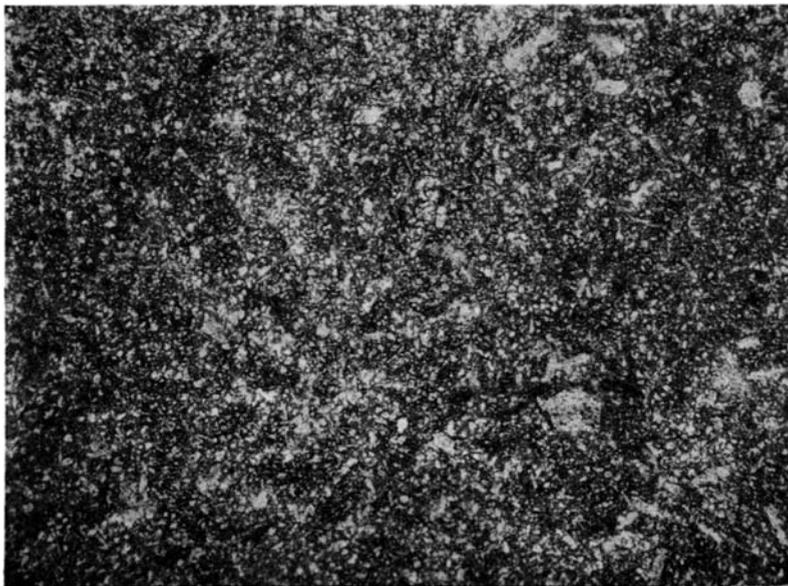
1. Суглинки бурые, делювиальные, мощностью от 2 до 10 м — Q_2 .
2. Глины темносерые и черные, сланцеватые, мощностью от 3,5 до 5 м — верхняя часть стешовской свиты — $C_1^{sgp_{2..}}$.
3. Пачка чередующихся слоев известняков и сланцеватых глин — нижняя часть стешовской свиты. Прослой известняка имеют мощность от 0,1 до 0,3 м. Общая мощность пачки колеблется от 3,5 до 4,5 м — $C_1^{sgp_{2..}}$.
4. Известняки с прослоями мергелей, так называемый тарусский известняковый горизонт. Мощность отдельных слоев известняка колеблется от 0,15 до 0,50 м. Общая мощность горизонта от 7,0 до 9,0 м — $C_1^{sp_1}$.
5. Известняки тонкозернистые черные, стигмариевые, мощность около 0,6 м — $C_1^{ok. ven.}$.
6. Плотные, частично перекристаллизованные известняки светлосерого и серого цвета, залегающие в виде слоев мощностью от 0,4 до 1,45 м. Общая мощность всей пачки известняков — около 8,0 м — $C_1^{ok. ven.}$.
7. Темносерые плотные известняки, залегающие в виде пластов мощностью 0,3--0,8 м. Вскрыты разведочными выработками на 3--4 м — $C_1^{ok. mich.}$.

Все известняки приведенного разреза чрезвычайно чистые с химической точки зрения. Они содержат 53,5—55% CaO, незначительные, менее 1%, количества MgO, полуторных окислов, и SiO₂ в сумме также всегда менее 1%.

Толща известняков, слагающая Митинское месторождение, была охарактеризована петрографически по двум расчисткам, расположенным в прибрежной части участка на расстоянии около 400 м одна от другой.

В этих расчистках вскрывается 44 отдельных пласта известняков, отделяющихся друг от друга прослоями мергелей, глин или крупными и выдержанными пластовыми трещинами. Каждый такой пласт, имеющий мощность не менее 10 см, охарактеризован по каждой из расчисток макроскопически и под микроскопом.

Изучение карбонатных пород показало, что среди известняков может быть выделено ограниченное число структурных типов, закономерно приуроченных к определенным частям толщи и слагающих основную массу пород разреза.



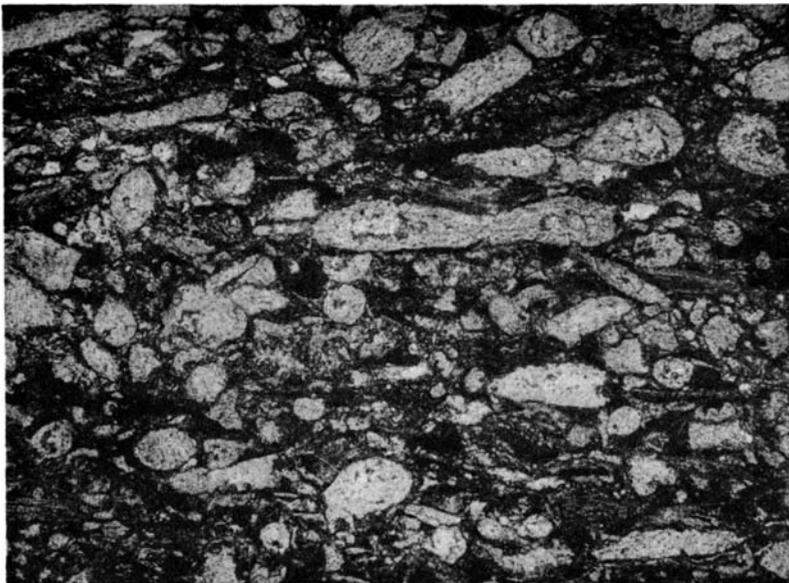
Фиг. 1. Шламмовый известняк. С анализатором, $\times 50$

В пределах вскрытого выработками разреза выделяются четыре основных типа известняков: шламмовые, детритусовые и детритусово-шламмовые, пелитоморфные и фораминиферово-водорослевые, частично перекристаллизованные.

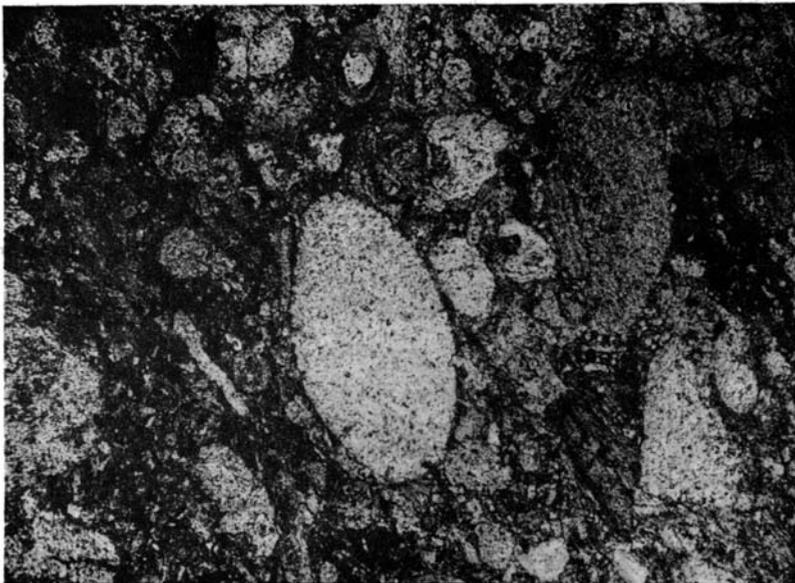
Шламмовые известняки (фиг. 1) состоят в основном из пелитоморфного и микрокристаллического кальцита, с включением обломков раковинок размером 0,03—3,0 мм. Эти обломки слагают иногда до 20—25% породы, обычно же составляют 10—15% ее. Количество пор в известняках — от 5 до 10%; размер пор колеблется от 0,05 до 0,1 мм. Иногда наблюдается кластогенный материал в виде единичных окатанных зерен кварца.

Известняки этого типа приурочены исключительно к нижней части стешовской толщи.

Детритусовые и детритусово-шламмовые известняки (фиг. 2 и 3) состоят в основном из крупных обломков брахиопод и иглокожих, которые слагают 60—80% всей массы породы. Крупные обломки имеют размеры до 1—1,5 мм. Часто наблюдается расположение обломков, ориентированное по слоистости. Цементируются



Фиг. 2. Детритусовый известняк с ориентированным расположением частиц. С анализатором, $\times 50$

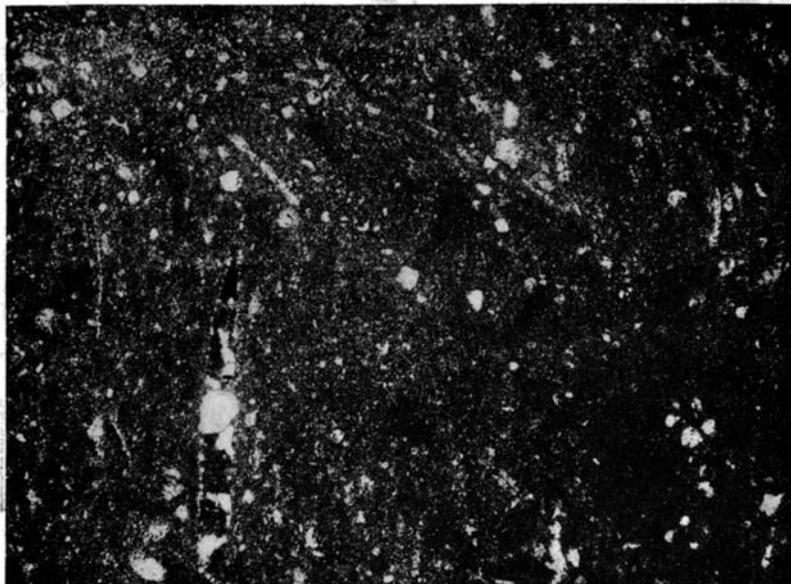


Фиг. 3. Детритусово-шламмовый известняк. С анализатором, $\times 50$

крупные обломки пелитоморфным кальцитом. В этих известняках наблюдаются поры двух типов: мелкие, размером до 0,02 мм, округлой формы и крупные, размером 0,1—0,15 мм, вытянутые параллельно общей ориентировке обломков фауны.

В некоторых шлифах количество крупных обломков уменьшается за счет появления мелкодетритусового материала. В этих случаях количества пелитоморфного кальцита, крупнообломочного материала и мелкого детритуса примерно равны.

Известняки этого типа приурочены к тарусскому горизонту; детритусовая разность слагает в основном верхнюю часть горизонта, а детритусово-шламмовая — нижнюю.



Фиг. 4. Пелитоморфный стигмариевый известняк. Без анализатора, $\times 50$

Пелитоморфный тип (фиг. 4) представлен в разрезе так называемыми черными стигмариевыми известняками, пронизанными в верхней части вертикальными ходами корневищ стигмарий. Стигмариевые известняки состоят в основном из пелитоморфного кальцита, количество которого достигает 90% всей массы породы. В значительном количестве наблюдаются отдельные изолированные зерна микрозернистого кристаллического кальцита. Пустоты вытянуты, частично заполнены вторичным крупнокристаллическим кальцитом и представляют собой ходы корневищ стигмарий. Количество пустот достигает 10% объема породы.

Черные стигмариевые известняки — самый верхний пласт веневского горизонта.

Фораминиферово-водорослевые известняки, частично перекристаллизованные (фиг. 5), состоят в основном из перекристаллизованных в той или иной степени обломков брахиопод, иглокожих и других организмов, а также целых раковинок фораминифер и обрывков водорослей, преимущественно сифонниковых (*Calcifolium okense* Schweitzer et Bir.). Крупные остатки организмов, размером 0,1—1,5 мм, слагают 40—80% всей массы породы. Крупные обломки цементируются микрокристаллическим кальцитом. Пелитоморфный кальцит присутствует

в количестве 10—15%; он приурочен к остаткам водорослей и раковинам фораминифер. Поры размером 0,02—0,1 мм наблюдаются в количестве 5—10%.

Исследования физико-механических свойств указанных четырех типов известняков показали наличие определенных зависимостей между структурами пород и их свойствами.

Приведенные в табл. 1 пределы колебаний констант основных свойств известняков разных типов позволяют дать каждому из них вполне определенную характеристику.



Фиг. 5. Частично перекристаллизованный фораминиферо-водорослевый известняк. Без анализатора, $\times 50$

Шламмовые известняки характеризуются, по данным табл. 1, относительной равномерностью свойств. Колебания цифр пористости и сопротивления сжатию для этого типа невелики. Шламмовые известняки снижают прочность от водонасыщения (от размокания); замораживание не сказывается сколько-нибудь существенно на дальнейшем снижении механической прочности.

Детритусовые и детритусово-шламмовые известняки тарусского горизонта характеризуются резкими колебаниями пористости и механической прочности. Пористость этих известняков колеблется от 6,3 до 16,5%, т. е. изменяется более чем в 2,5 раза, а механическая прочность — в 3—4 раза. Известняки, в которых раковинный детритус существенно преобладает над другими составными частями породы, теряют прочность от размокания в значительно большей степени, чем шламмовые известняки. Замораживание вызывает дальнейшее снижение прочности известняков этого типа на 20—25%.

Пелитоморфные, так называемые стигмариевые, известняки веневского горизонта, подобно шламмовым известнякам стешовской свиты, характеризуются выдержанностью свойств. Вследствие малой пористости потеря прочности от размокания в этих известняках не наблюдается. Несмотря на это, замораживание вызывает некоторое снижение механической прочности. Более высокая механическая прочность целито-

Физико-механические свойства известняков различных структурно-литологических типов

Тип известняка	Пористость (в %)	Сопротивление сжатию (в кг/см ²)			Коэффициент размокания	Коэффициент морозостойкости
		сухие образцы	водонасыщенные образцы	образцы после 25-кратного замораживания		
Шламмовые (стешовская толща) .	5,2—7,6	680—900	500—680	550—740	0,73—0,83	0,81—1,0
Детритусовые и детритусово-шламмовые (тарусский горизонт)	6,3—16,5	370—1290	290—940	240—680	0,60—0,98	0,66—0,90
Пелитоморфные (стигмариевые известняки веневского горизонта)	1,8—5,3	900—1340	900—1350	920—1025	1	0,76—1,0
Фораминиферово-водорослевые, частично перекристаллизованные (веневский горизонт)	6,0—12,2	290—1150	350—1110	250—1020	0,75—1,0	0,72—1,0

морфных известняков объясняется их некоторой перекристаллизацией, свойственной всем известнякам веневского яруса, которая обусловила лучшее сцепление частиц породы между собой и привела к некоторому ее уплотнению.

Фораминиферово-водорослевые частично перекристаллизованные известняки веневского горизонта, подобно детритусовым известнякам тарусского горизонта, отличаются пестротой свойств. Колебания пористости и временного сопротивления сжатию в них очень велики: пористость изменяется в 2 раза, а механическая прочность — в 3—4 раза.

Фораминиферово-водорослевые, частично перекристаллизованные известняки существенно отличаются от детритусовых известняков по размоканию и морозостойчивости. Прочность их несколько снижается от размокания. Это снижение прочности для подавляющего числа проб не превышает 15%. Лишь в одном случае снижение прочности от размокания достигло 25%. Дальнейшее снижение прочности от замораживания наблюдается у всех проб этого типа, однако оно не превышает 5—10%.

Все известняки серпуховской и окской свит имеют очень выдержанные удельные веса, колеблющиеся от 2,698 до 2,706, что объясняется большой чистотой их химического состава.

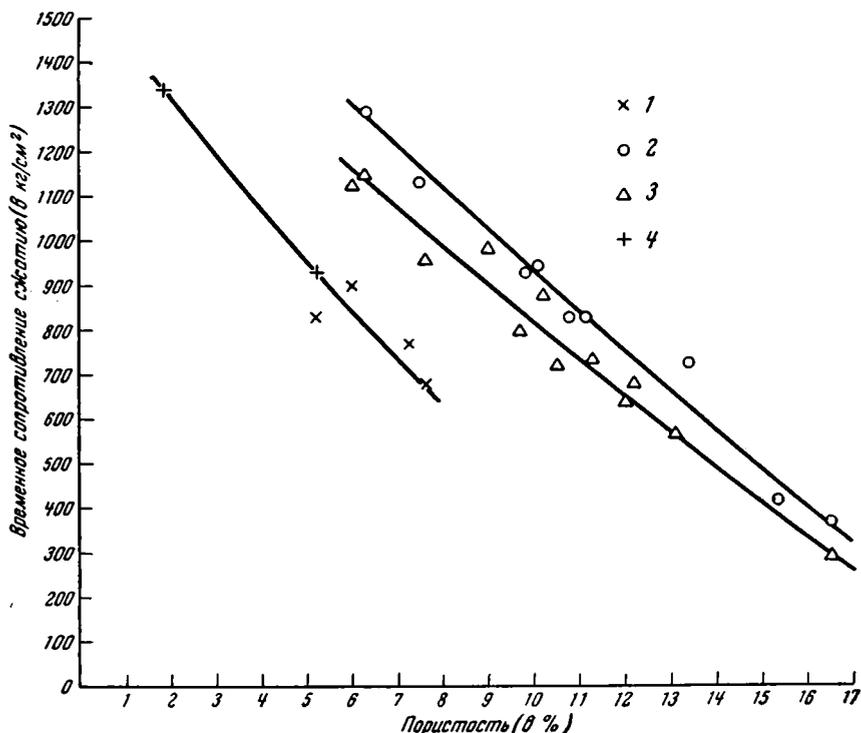
Для всех типов известняков установлена четкая зависимость между пористостью и механической прочностью. На графике (фиг. 6) эта зависимость изображена для каждого структурно-литологического типа пород. При рассмотрении этого графика устанавливаются следующие закономерности:

1. В пределах каждого структурно-литологического типа известняков с уменьшением пористости происходит увеличение прочности на сжатие.
2. При одной и той же пористости известняки различных структурных типов имеют разную прочность. При этом наименьшую прочность имеют шламмовые и пелитоморфные известняки, значительно прочнее (на 250—

300 кг/см²) фораминиферово-водорослевые, частично перекристаллизованные известняки и еще прочнее (на 50—100 кг/см²) детритусовые известняки.

Таким образом, при одной и той же прочности известняки разных структурных типов характеризуются различной пористостью; более пористые детритусовые известняки имеют такую же механическую прочность, как и более плотные шламмовые известняки.

3. Известняки шламмовые и пелитоморфные имеют очень сходную физико-механическую характеристику. Шламмовые известняки лишь несколько более пористы по сравнению с пелитоморфными. Они занимают правую нижнюю часть общей кривой, тогда как пелитоморфные располагаются в левой верхней ее части.



Фиг. 6. Зависимость прочности известняков от пористости и структурно-литологического типа породы

1 — шламмовые известняки (стешовская толща, $C_1^{SGP_1+2}$); 2 — детритусовые известняки (тарусский горизонт, $C_1^{SGP_1}$); 3 — фораминиферово-водорослевые известняки (веневский горизонт, $C_1^{ok. ven_2}$); 4 — пелитоморфные известняки (веневский горизонт, $C_1^{ok. ven.}$)

4. В пределах наблюдавшихся размерностей частиц рассматриваемых типов известняков несомненное влияние на прочность имеет крупность частиц, слагающих основную массу породы; чем крупнее частицы, слагающие породу, тем она прочнее.

Установленные закономерности позволяют предложить при разведках месторождений известняков на бут, щебень и штучный камень и исследованиях их свойств существенные изменения в методах опробования и оценки качества камня.

Последовательность и объемы работ должны быть следующими:

1. Достаточно подробными петрографическими исследованиями каж-

дого пласта по двум-трем полным разрезам выявляются основные структурно-литологические типы пород, слагающие в основном исследуемую толщу или пачку слоев.

2. Полные физико-механические исследования производятся для каждого выделенного типа пород на ограниченном числе проб. Пробы эти должны быть распределены более или менее равномерно как по площади, так и по мощности разреза.

3. Для всех остальных пластов, вскрытых выработками, отбираются пробы для определений удельного и объемного весов, по которым производится подсчет пористости. При изучении известняков серпуховской и окской свит подмосковного карбона в приокских районах нет даже необходимости в определении удельного веса, ибо, как это указано выше, колебания его очень незначительны и он может быть принят для всех случаев равным 2,70.

Для всей площади изучаемого месторождения может быть дана достаточно точная качественная характеристика камня по пористости и структуре, с учетом результатов полных физико-механических испытаний ограниченного числа проб.

Аналогичные зависимости между структурами карбонатных пород и их физико-механическими свойствами были установлены Б. В. Залесским, В. В. Лапиным и Н. С. Тер-Григорян (1947) для известняков и доломитов восточной части Самарской Луки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

Залесский Б. В., Лапин В. В. и Тер-Григорян Н. С. Влияние степени однородности карбонатных пород на их физико-механические свойства. Тр. Инст. геол. наук Акад. Наук СССР, 1947, вып. 84, петрогр. сер., № 27.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Б. П. Б е л и к о в. Модули упругости различных типов горных пород СССР	3
Б. В. З а л е с с к и й и К. П. Ф л о р е н с к и й. О некоторых основных пред- посылках испытаний каменных строительных материалов на морозоустой- чивость	39
В. В. Л а п и н и Г. С. Б у р л а к о в. Использование топливных шлаков для получения строительных материалов (особенности структуры и состава) . .	51
Ю. А. Р о з а н о в. Влияние макроструктурных особенностей горных пород на анизотропность их механических свойств	70
В. Я. С т е п а н о в и К. П. Ф л о р е н с к и й. Наблюдения над характером разрушения белокаменных памятников архитектуры Владимиро-Суздаль- ской Руси XII—XIII вв.	76
Ю. А. Р о з а н о в. Зависимость физико-механических свойств известняков от особенностей их структуры	102

*Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР*

*

Редактор *С. Т. Попова*
Технический редактор *Т. А. Землякова.*
Корректор *А. В. Ключарев*

*

РИСО АН СССР № 5142. Т-09358.
Издат. № 3732. Тип. заказ № 708.
Подп. к печ. 15/XII. 1952 г. Формат бум. 70×108¹/₁₆.
Печ. л. 9,59. Бум. л. 3,5. Уч.-издат. 9,5.
Тираж 1200.

Цена по прейскуранту 1952 г. 6 руб. 65 коп.
2-я тип. Издательства Академии Наук СССР
Москва, Шубинский пер., д. 10

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
11 } 48	19 св.	в значениях	в значениях
	20 св.	6,5·10 ⁵	6,0·10 ⁶
52	14 св.	1 65	1,65
55	6 св.	шалков	шлаков
	Подпись под фиг. 3	обесцвеченным	с обесцвеченным
58 } }	Подпись под фиг. 7	Микроструктура кварцево- слюдаисто-глинистой породы с прожилками органики (чер- ные). Без анализатора × 76	Микроструктура глинисто-же- лезистой породы. Без анали- затора, × 20
	Подпись под фиг. 8	Микроструктура глинисто-же- лезистой породы. Без анализа- тора, × 20	Микроструктура кварцево-слю- дисто-глинистой породы с про- жилками органики (черные). Без анализатора, × 76

