

УДК 593.7

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БОКСА – УИЛСОНА  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МРАМОРА (ЧАСТЬ 1)**

*К.А. Герман*

Показано использование метода Бокса – Уилсона для экспериментального изучения изменения свойств мрамора под воздействием импульсов электрического тока, позволяющего осуществлять поиск оптимальных условий, построение интерполяционных формул, выбор существенных факторов, оценивать и уточнять константы теоретических моделей (например, кинетических), выбор наиболее приемлемых из некоторого множества гипотез о механизме явлений, исследование диаграмм "состав – свойство".

*Ключевые слова:* планирование эксперимента; метод Бокса – Уилсона; разрушение мрамора; трещина.

---

**BOX-WILSON METHOD IMPLEMENTATION  
TO STUDY OF ELECTRIC FIELD INFLUENCE  
ON MARBLE DEFORMATION BEHAVIOR (PART 1)**

*K.A. Herman*

Box – Wilson method was used for experimental study of marble deformation behavior on exposure to electric current. This method gives statistical-mathematical model of physical-mechanical processes with using of factorial planning, regression analysis and gradient motion. Additionally, it lets scan optimality condition, modeling of interpolation formulas, selection of dominant factors, estimation and elaboration of theoretical models' constants (e.g. kinetic), selection of more acceptable hypotheses on mechanism of effect and study of composition-property diagram.

*Key words:* design of experiments; method's Box – Wilson; disintegration marble; crack.

Электрические и магнитные поля могут воздействовать на горные породы непосредственно за счет смещения, электрического и магнитного ориентирования (поляризация и намагничивание), возбуждения электронов и ионов и т. д. или косвенно – через тепловое поле, в которое трансформируется электрическая энергия в породах.

В связи с этим выделяют три группы явлений: нагрев пород, непосредственное изменение свойств пород под воздействием поля и электрический пробой пород.

*Изменение прочности пород.* Электромагнитное поле не только является источником тепла в горной породе, но и непосредственно воздействует на кристаллическую решетку минералов, существенно изменяя их свойства. Это связано с тем, что дислокации, различные дефекты, имеющиеся в породе, как правило, обладают некоторым электрическим зарядом. Поэтому внешнее электромагнитное поле

способно переориентировать дислокацию или сдвинуть её в определенном направлении. Это изменяет процесс деформации пород.

В результате воздействия электромагнитного поля на некоторые породы даже при отсутствии нагрева последних, происходит довольно существенное изменение модуля Юнга, предела прочности при сжатии и возрастание пластической деформации. Это было отмечено и подтверждено в работах [1, 2] после экспериментов на образцах из мрамора.

Следующий этап – установление связи между прочностью горных пород и компонентами электрического поля, что и было выполнено в данной работе.

В предложенном эксперименте было изучено влияние электрического тока, который характеризуется напряжением, силой, плотностью тока, частотой колебаний, сважностью.

Величины, характеризующие физико-технические параметры горных пород и минералов и их изменчивость, подразделили на две группы. Это внутренние факторы, связанные с горной породой: минеральный состав и строение – для пород, химический состав, кристаллическая решетка и т. д. – для минералов, и внешние (различные физические поля, внешнее воздействие).

Каждый фактор может принимать в опыте одно из нескольких значений. Такие значения будем называть уровнями. Может оказаться, что фактор способен принимать бесконечно много значений (непрерывный ряд). Однако на практике точность, с которой устанавливается некоторое значение, ограничена. Поэтому мы вправе считать, что всякий фактор имеет определенное число дискретных уровней. Это соглашение существенно облегчает построение модели по принципу “черного ящика”, описание поведения исследуемого признака под воздействием внешних факторов, облегчает построение карты проведения эксперимента, а также упрощает оценку их сложности.

Фиксированный набор уровней факторов (т. е. установление каждого фактора на некоторый уровень) определяет одно из возможных состояний “черного ящика”. Одновременно это определяет и условия проведения одного из возможных опытов. Если перебрать все возможные наборы состояний, то можно получить полное множество различных состояний данного “черного ящика”. Одновременно это определяет число возможных опытов.

Первой серии опытов предшествовал этап неформализованных решений, направленных на выбор локальной области факторного пространства. При этом оценивались границы областей определения факторов, задаваемые либо принципиальными ограничениями, либо конкретными условиями проведения исследования. Установление границ области связано с тщательным анализом априорной информации об изменении параметра оптимизации (исследуемого фактора).

Локальная область проведения эксперимента выбиралась в два этапа: определение основного уровня и интервалов варьирования. Основной (нулевой) уровень – многомерная точка в факторном пространстве, задаваемая комбинацией уровней факторов. Построение плана эксперимента сводилось к выбору экспериментальных точек, симметричных основному уровню. При установлении основного уровня приходилось рассматривать различные ситуации. Ситуации задавались информацией о наилучших точках режимов воздействия и определялись решения.

Следующий этап – выбор интервалов варьирования факторов. Для каждого фактора определя-

ли два уровня, на которых он варьировался в эксперименте. Уровни факторов изображали двумя точками на координатной оси, симметричными относительно основного уровня. Один из уровней – верхний, другой – нижний. Интервалом варьирования факторов называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний. В ходе планирования эксперимента выбирали среднее значение фактора, и для проведения использовали крайние возможные значения внешних факторов. Разброс уровней выбирали наибольшим, так как в этом случае коэффициенты принимали максимальное по модулю значение.

Параметр оптимизации – это исследуемое свойство, по которому оптимизируется процесс воздействия. Он должен быть количественным. Признак должен измеряться при любой возможной комбинации выбранных уровней факторов.

Общим фундаментом для изучения горных пород служат базовые физические параметры [3]. К базовым отнесены 12 элементарных, исходных и независимых физических параметров, позволяющих вычислять максимальное количество других параметров пород.

Перечислим механические параметры, которые касаются нашего эксперимента.

*Предел прочности при сжатии* (критическое значение одноосного растягивающего напряжения, при котором происходит разрушение). Обозначается  $\sigma_c$ , единицы измерения Па, пределы изменения 104–108.

*Модуль продольной упругости*, или модуль Юнга (коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением и соответствующей ему продольной упругой деформацией). Обозначается  $E$ , единицы измерения Па, пределы изменения 105–1011.

*Коэффициент Пуассона* (коэффициент пропорциональности между упругими продольными и поперечными деформациями при одноосной нормальной нагрузке). Обозначается  $\nu$ , величина безразмерная, пределы изменения 0,1–0,6.

Для достижения цели исследования необходимо, чтобы параметр оптимизации действительно оценивал эффективность изменения состояния объекта исследования. Это требование является главным, определяющим корректность постановки задачи.

Для исследований был взят мрамор месторождения Ак-Таш (Кыргызстан). Цвет мрамора – белый. Структура исследуемого материала – тонкозернистая.

Мрамор является карбонатной породой, раскристаллизованной в результате метаморфизма,

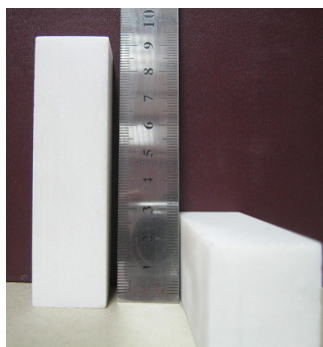


Рисунок 1 – Образец для испытаний (материал – мрамор месторождения Ак-Таш, Кыргызстан)

состоящей в основном из кальцита и доломита. Содержит примеси – кварц и другие твердые минералы. Удельный вес мрамора 2,69–2,88. Объемный вес 2,59–2,86. Твердость по шкале Мооса 3–3,5. Пористость мрамора – в пределах 0,7–1,5 %.

Водопоглощение мрамора 0,12–1,5 вес. %. Удельное объемное электрическое сопротивление мрамора меняется от 105 до 1013 ом·см; напряжение пробоя – от 10 до 45 кВ/см. Предел прочности при сжатии от 400 до 1000 кг/см<sup>2</sup>; наименьшая прочность у крупнокристаллического мрамора, наибольшая – у тонкозернистых. Предел прочности при разрыве 60–150 кг/см<sup>2</sup>; прочность при изгибе 80–295 кг/см<sup>2</sup>.

Образец представлял собой призму размера 90 × 30 × 30 мм. Линейные размеры отклонялись от заданных в пределах ± 0,05 мм (10<sup>-3</sup>м) (рисунок 1).

**План эксперимента.** Рассмотрим поставленную задачу. Электрический ток характеризуется плотностью тока, частотой, формой импульса. Прочность горных пород в значительной степени определяется составом минералов, структурой и количеством воды. Требуется установить связь между прочностью горных пород и электрическим током, проходящим через исследуемый образец.

Для этого требуется изучить физико-механические константы образца при различных режимах нагружения. Чтобы узнать число различных состояний режимов, достаточно число уровней факторов (если оно для всех факторов одинаково) возвести в степень числа факторов  $k$ :  $p^k$ , где  $p$  – число уровней. В нашем случае ранг равен трем ( $k = 3$ ), число уровней  $p = 2$ . Таким образом, число состо-

яний (опытов) будет равно  $2^3 = 8$ . Для гарантии воспроизводимости результатов испытаний необходимо провести минимально по три опыта в каждом состоянии.

Приращение механической нагрузки было постоянным и составляло 122 кг/см<sup>2</sup> в час. Нагружение электрическим током основывалось на следующих факторах: напряжение, частота и скважность. С учетом уровней эти величины равны: напряжение – 20 и 50 Вольт; частота 20 и 20·10<sup>3</sup> Гц; скважность 2 и 4.

Если в процессе исследования окажется невозможным построение полной диаграммы напряжение – деформации, то вычисление модуля упругости вполне осуществимо.

В качестве испытательной установки был использован гравитационный пресс УДИ-Л с оборудованием, позволяющим провести измерения с заданной точностью [4]. Особенность пресса – бесшумное плавное нагружение испытываемых образцов. Скорость нагружения составила 11,997 МПа·ч.

В качестве датчиков, регистрирующих деформацию (продольную и поперечную) и нагрузку, применяли линейные дифференциальные трансформаторы LVDT, предназначенные для измерения линейных перемещений. На установке использовали датчики LVDT фирмы Lucas Shaevitz двух типов: MHR 010 и MHR 050, обладающие диапазонами регистрируемых линейных перемещений – ± 0,10'' ≈ ± 2,54 мм и ± 0,05'' ≈ ± 1,27 мм, соответственно.

Воздействие электрическим током осуществляли генератором электрических импульсов Г5-54. Возбуждение материала осуществляли импульсами прямоугольной формы положительной полярности.

#### Литература

1. Герман К.А. Изменение прочности мрамора при воздействии электрического поля / К.А. Герман // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 7. С. 45–47.
2. Герман К.А. Влияние электрических полей на напряженно-деформированное состояние мраморных образцов / К.А. Герман // Пятый межд. симп. 19–24 июня, 2011. Бишкек: НС РАН. Т. 2. С. 142–145.
3. Ржевский В.В. Основы физики горных пород: учебник для вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. М.: Недра, 1984. 356 с.
4. Герман К.А. Установка для натурных исследований деформационных процессов в горных породах / К.А. Герман, Б.В. Боровский // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 68–73.