

Е.А. Ермолович, А.В. Овчинников

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛА

Рассмотрено влияние температуры на физико-механические характеристики (модуль упругости и плотность) образцов мела с естественными структурными связями при естественной влажности равной 14%. Подготовлено и испытано более 30 образцов, которые подвергались температурному воздействию в течение 30 минут в камере тепла и холода КТХ при природном диапазоне температур (от -30 до $+40$ °С $\pm 2^\circ$), характерных для районов разработки мела в Белгородской области. Приведены методики изготовления образцов и определения плотности, влажности и модуля упругости. Представлены результаты экспериментальных исследований. Относительные изменения физико-механических характеристик от температуры носят экстремальный характер и хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями второго порядка. Достоверность аппроксимации составляет 0,87–0,93 для плотности и модуля упругости соответственно. Результаты испытаний обработаны с помощью программы «АСИС Report». Дан анализ изменения плотности и модуля упругости (модуля Юнга) образцов в зависимости от воздействия температурного фактора. Установлено, что при относительно небольших изменениях плотности наблюдаются значительные изменения модуля упругости. Полученные зависимости позволяют понять механизмы протекающих в породе изменений под воздействием переменных физических полей и учитывать их влияние при разработке месторождений мела.

Ключевые слова: мел, разработка месторождений, разрушение горных пород, температурный фактор, модуль упругости, плотность, естественная влажность.

Мел является широко используемым общераспространенным полезным ископаемым, и наиболее крупные месторождения качественного мела сосредоточены в Белгородской области. Годовой объем добычи мела составляет 567,84 тыс. т, на Государственном балансе учтено 381,7 млн м³ [1], а прогнозные ресурсы данного полезного ископаемого практически не ограничены. Разработка месторождений ведется исключительно открытым способом — карьерами в один или несколько уступов. Выемка мела производится экскаваторами, транспортировка — обычно автосамосвалами.

Мел относится к полускальным породам, но его физико-механические характеристики зависят не только от структурно-текстурных особенностей, соотношения слагающих его компонентов, но и от природных факторов окружающей среды: влажности и температуры, или в соответствии с [2] от вещественного и теплового полей, существенно влияющих на его разрушение. Температура окружающей среды в районах разработки мела изменяется от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом (на солнце). Влажность мела зависит от погодных условий и от глубины залегания уровня грунтовых вод в меловом водоносном горизонте.

Разрушение горных пород – основной процесс горного производства, зависящий от их физико-механических свойств. Одним из наиболее интересных параметров, входящих в комплекс характеристик изучаемых свойств пород, является модуль упругости, отражающий упругие свойства.

Модуль упругости определяет максимальную интенсивность сил межмолекулярного сцепления внутри кристаллов f , характеризующую теоретическую прочность твердого тела, если бы оно было идеальным монокристаллом [3]:

$$f \approx 0,1E,$$

где E – модуль упругости.

Модуль упругости так же входит в выражения для определения удельной работы разрушения:

- для идеально упругой породы:

$$A_0 = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E},$$

- при склонности породы к пластическому деформированию:

$$A_0 + A_{\phi} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E} \left(2 \frac{E}{E_{деф}} - 1 \right),$$

где A_0 – энергия непосредственного разрушения; A_{ϕ} – производительные затраты энергии, связанные со свойствами породы; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии; E – модуль упругости; $E_{деф}$ – модуль деформации.

Влияние температуры на физические свойства карбонатных пород в отечественной и зарубежной научной литературе исследовалось на примере известняков и доломитов [4–9]. Однако примеры изменения упругих свойств мела в диапазоне температур от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в литературе не описаны.

Целью данной работы является исследование влияния температуры на модуль упругости и плотность образцов мела с естественными структурными связями при естественной влажности.

Исследования проводились в лаборатории механики грунтов и горных пород НИУ «БелГУ». Изготовление образцов мела для испытаний осуществлялось вручную путем постепенного вырезания ножом и режущими кольцами из массивных монолитов, отобранных в карьере месторождения «Зеленая Поляна», расположенного в г. Белгороде. Изучаемые меловые отложения в возрастном отношении соответствуют кампанскому и маастрихтскому ярусам верхнего отдела меловой системы.

Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 37 мм. За основу брали режущее кольцо для стабилометрических испытаний диаметром 38 мм и высотой 76 мм. Высота образца выбиралась таким образом, чтобы ее отношение к диаметру было максимально приближено к 2, но в связи с ручным изготовлением образцов, трещиноватостью породы, а также другими ее специфическими особенностями высота некоторых образцов получалась немногим менее 75 мм, а диаметр 37 мм. Так как исследовалась порода с естественной влажностью, то образцы испытывались сразу после их изготовления. Всего было подготовлено и испытано более 30 образцов.

На первом этапе определялись характеристики влажности и плотности, подготовленных к испытанию образцов, которые составили следующие значения: естественная влажность — 14,30–14,50%; естественная плотность — 1,56–1,60 г/см³.

Пробы на влажность отбирались в металлические бюксы в процессе вырезания образцов из монолитов. Взвешенные бюксы с открытыми крышками помещались в сушильный шкаф и выдерживались при температуре 105–107 °С в течение 6 часов. Вычислялась влажность по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100\%,$$

где m_0 — масса пустого металлического бюкса с крышкой, г; m_1 — масса бюкса с влажной породой, г; m_2 — масса бюкса с высушенной породой, г.

Естественная плотность образцов мела определялась методом непосредственных измерений, так как из монолитов вырезались образцы правильной цилиндрической формы, а их объем (V) определялся простым обмером штангенциркулем с точно-

стью до 0,01 см. Масса образцов (m) определялась с точностью до 0,01 г. Плотность рассчитывалась по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

На втором этапе образцы подвергались температурному воздействию в камере тепла и холода КТХ, которая предназначена для получения и поддержания внутри рабочей камеры стабильной температуры от -50 до $+60$ °С. Пределы допускаемых отклонений среднего значения температуры в рабочей камере от заданной температуры составляют не более ± 2 °С. На рис. 1 представлены подготовленные к испытаниям образцы мела в рабочей камере КТХ. Исследование влияния температуры на физико-механические характеристики мела проводилось при следующих ее значениях: -30 , -20 , -10 , 0 , $+10$, $+20$, $+30$ и $+40$ ± 2 °С. При каждом значении температуры испытывалось не менее 3-х образцов.

Ранее авторами было установлено, что максимальные значения прочности образцов фиксируются при воздействии отрицательных температур в течение первых 30 мин [10]. Поэтому в данном эксперименте образцы выдерживались в камере КТХ в течение 30 мин.

На третьем этапе образцы мела, после температурного воздействия, по одному извлекались из КТХ, определялась их масса с точностью до 0,01 г и сразу же проводились испытания методом одноосного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [11] на автоматизированной 10-тонной установке одноосного сжатия ГТ 0.5.1 конструкции ООО «НПП «ГЕОТЕК» при заданной скорости нагружения равной 2 мм/мин. При этом в автоматическом режиме датчиками линейных перемещений фиксировались осевые и радиальные деформации испытуемых



Рис. 1. Образцы мела в камере тепла и холода КТХ

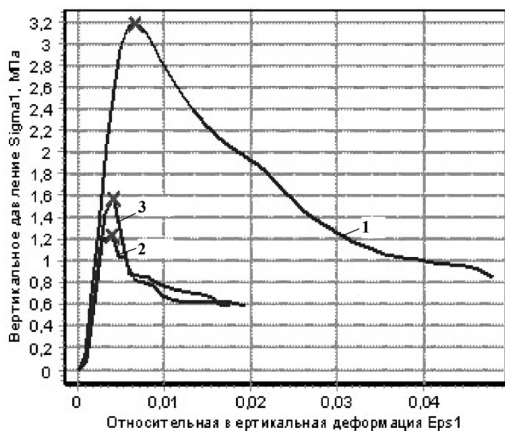
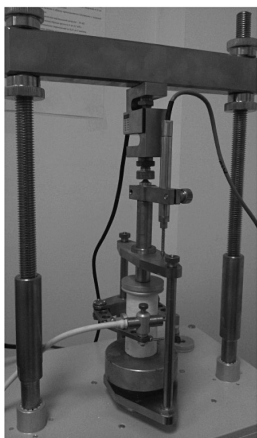


Рис. 2. Образец мела в приспособлении одноосного сжатия (слева) и примеры графиков зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ (справа): 1 – образец при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – образец при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – образец при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

образцов. Обработка результатов одноосных испытаний проводилась с помощью программы «АСИС Report». На рис. 2 представлен образец мела в приспособлении одноосного сжатия в процессе испытаний и примеры типичных графиков зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ «относительная вертикальная деформация – вертикальное давление» при температурах -30 , $+20$ и $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Во всех случаях температурного воздействия при одноосном сжатии наблюдалось упругое поведение породы. Все испытанные образцы до 50–60% от значения предельной прочности имели предел пропорциональности между деформациями и напряжениями. Они хрупко разрушались при небольших уровнях относительной вертикальной деформации до 0,5–1% (см. рис. 2).

Модуль упругости, или как его называют в механике сплошной среды – модуль Юнга, является коэффициентом пропорциональности зависимости «деформация – напряжение». Для исследуемых образцов мела он определялся в программе «АСИС Report» по графикам зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ согласно выражению:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon},$$

где $\Delta\sigma$ и $\Delta\epsilon$ – приращения соответственно вертикального напряжения и относительной вертикальной деформации.

Известно, что поведение горных пород под нагрузкой при незначительных деформациях до 0,1% является практически упру-

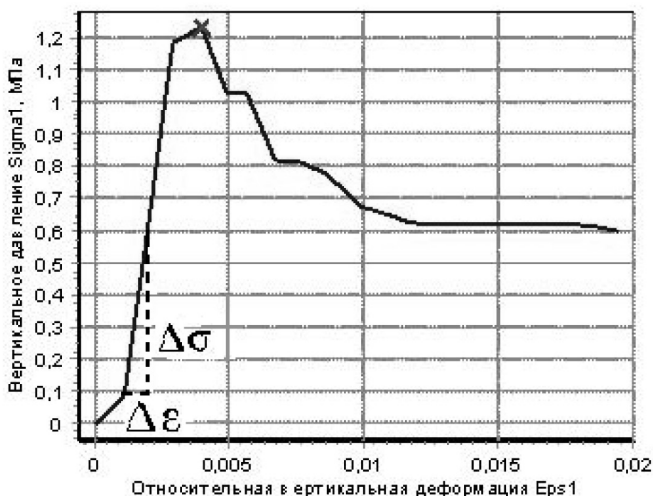


Рис. 3. Определение модуля упругости по графику зависимости $\sigma = f(\epsilon)$

гим. При подобном уровне деформации можно говорить о том, что мы определяем чисто упругий модуль деформации при пренебрежимо малом значении остаточной деформации [12]. Для мела ветви нагрузки до 30–50% предела прочности и разгрузки практически сливаются. Поэтому для образцов мела определялся касательный модуль упругости на уровне напряжений в 30–50% от предельной прочности. Как показано на рис. 3 на графиках $\sigma = f(\epsilon)$ выбирался прямолинейный участок, к которому проводилась касательная прямая при малых и небольших уровнях деформации.

Физико-механические характеристики мела в зависимости от температуры

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа
-30	1590(1570)	815,3
-20	1590 (1580)	685,3
-10	1590 (1570)	569,8
0	1560 (1550)	410,4
+10	1580 (1560)	500,3
+20	1580 (1560)	456,9
+30	1570 (1530)	522,7
+40	1570 (1510)	638,3

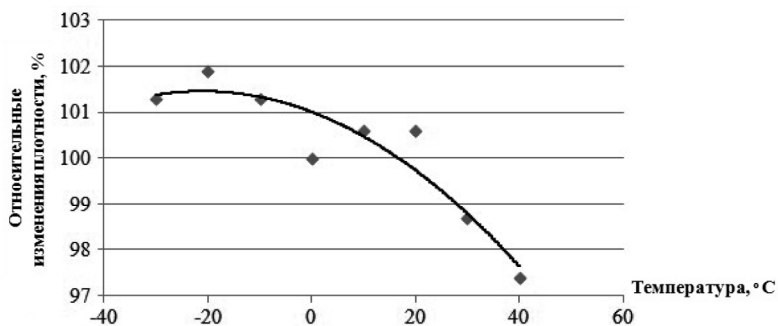


Рис. 4. График зависимости относительного изменения плотности образцов мела от температуры

Полученные в результате экспериментальных исследований физико-механические характеристики мела при разном уровне воздействия температурного фактора представлены в таблице. Перед скобками указаны природные значения характеристик плотности, в скобках – после пребывания образцов в КТХ.

Изменение плотности и модуля упругости образцов мела от температуры хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями второго порядка с достоверностями $R^2 = 0,87$ и $0,93$ соответственно:

$$\Delta\rho = -0,01T^2 - 0,0431T + 101$$

$$\Delta E = 0,0547T^2 - 1,2173T + 116,13,$$

где $\Delta\rho$ – относительное изменение плотности образца, %; ΔE – относительное изменение модуля упругости образца, %; T – температура, °C.

Графики зависимости приведены на рис. 4, 5.

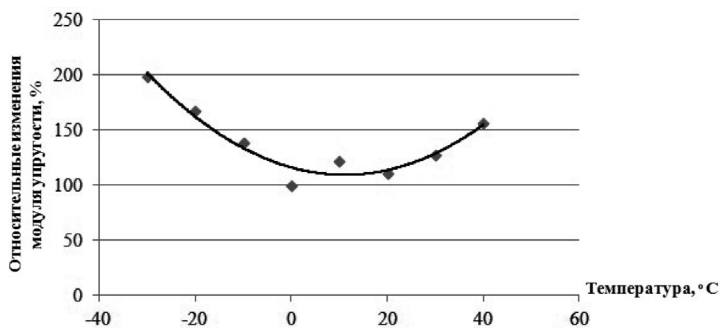


Рис. 5. График зависимости относительного изменения модуля упругости образцов мела от температуры

В результате исследований установлено, что при относительно небольших изменениях плотности наблюдаются значительные изменения модуля упругости. Наименьшие значения модуля упругости характерны для температур 0 °С и составляют 410 МПа. Наибольшие значения модуля упругости характерны для области отрицательных температур, и при температуре -30 °С при природной влажности от 13 до 14% он увеличивается на 99% и превышает значение 800 МПа, что связано с образованием в породе криогенных структурных связей. При +30 °С происходит увеличение модуля упругости на 27%, который при +40 °С достигает значения 640 МПа (56%), что связано с упрочнением структурных связей между частицами породы при испарении из нее влаги.

Полученные зависимости позволяют понять механизмы протекающих в породе изменений под воздействием переменных физических полей и учитывать их влияние при разработке месторождений мела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2013 году: Государственный доклад / Под ред. Д. Г. Храмова.* – М.: Министерство природных ресурсов РФ, 2014. – 384 с.
2. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
3. *Тангаев И. А.* Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
4. *Курилко А. С.* Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. – 153 с.
5. *Захаров Е. В.* Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: Дис. ... канд. техн. наук. – Якутск, 2012. – 120 с.
6. *Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., Alarcón J. C.,* 2013, Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite // *Engineering Geology.* 2013. Vol. 167. pp. 117–127.
7. *Xian Biao Mao, Lian Ying Zhang, Ai Hong Lu* Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature // *Science in China Series E: Technological Sciences.* 2009. Vol. 52, Issue 3, pp. 641–646.
8. *Rutter E. H.* The influence of interstitial water on the rheological behaviour of calcite rocks // *Tectonophysics.* 1972. Vol. 14(1), pp. 13–33.
9. *Rutter E. H.* The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks // *International Journal of Geotectonics and Tectonophysics.* 1974. Vol. 22, pp. 311–334.
10. *Ермолович Е. А., Овчинников А. В.* Анализ влияния времени воздействия отрицательных температур на прочность белого писчего мела //

Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Материалы 11 Международной конференции / Под общ. ред. Р.А. Ковалева. — Тула: ТулГУ, 2015. — С. 180–183.

11. *ГОСТ 12248-2010*. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Введ. 2011-01-06. — М.: МНТСК, 2011. — 156 с.

12. *Болдырев Г. Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с. **ПЛАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Ермолович Елена Ахмедовна*¹ — доктор технических наук, доцент, профессор,

e-mail: elena.ermolovich@mail.ru,

*Овчинников Александр Владимирович*¹ — старший преподаватель,

e-mail: ovchinnikov@bsu.edu.ru,

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 2, pp. 52–61.

UDC
622.02:531

E.A. Ermolovich, A.V. Ovchinnikov
THE EFFECT OF TEMPERATURE
ON THE PHYSICO-MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF CHALK

The effect of temperature on the physical and mechanical characteristics (modulus of elasticity and density) of the chalk samples with natural structural links with the natural moisture content equal to 14% is considered. More than 30 samples that were subjected to the effects of temperature for 30 minutes in the chamber of heat and cold KTH at the natural temperature range (-30 to $+40$ °C \pm 2°), typical for the areas of chalk development in Belgorod region are prepared and tested. Methods of sample preparation and determination of density, moisture and elastic modulus are given. The experimental results are presented. The relative changes in physical and mechanical characteristics from the temperature are extreme in nature and are well approximated by polynomial functions of the second order. The approximation reliability is 0,87–0,93 for the density and elastic modulus, respectively. The test results are processed by the program «ASIS Report». Analysis of changes in the density and elastic modulus (Young's modulus) of samples depending on the temperature factor exposure is given. It is found that significant changes in elastic modulus are observed at relatively small changes in density. The lowest values of the elastic modulus are characteristic for the temperature 0 °C, and they are equal to 410 MPa. The highest values of the elastic modulus are characteristic for negative temperatures. At a temperature of -30 °C with the natural humidity from 13 to 14%, it increases to 99% and exceeds the value of 800 MPa, which is associated with the formation of cryogenic structural connections in the rock. At 30 °C the elastic modulus is increased by 27%, which at 40 °C reaches 640 MPa (56%). This is related to hardening of the structural links between rock particles by evaporation of moisture from it. The obtained dependences allow us to understand the mechanisms of the changes occurring in the rock

under the influence of variable physical fields and to take into account their impact in the development of chalk deposits.

Key words: chalk, development of deposits, rock destruction, temperature factor, modulus of elasticity, density, natural moisture.

AUTHORS

*Ermolovich E.A.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Assistant Professor, e-mail: elena.ermolovich@mail.ru,

*Ovchinnikov A.V.*¹, Senior Lecturer, e-mail: ovchinnikov@bsu.edu.ru,

¹ Belgorod State National Research University,
308015, Belgorod, Russia.

REFERENCES

1. *O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2013 godu: Gosudarstvennyy doklad*. Pod red. D. G. Khramova (The state and utilization of mineral reserves in the Russian Federation in 2013: Government Report. Khramov D. G.), Moscow, Ministerstvo prirodnnykh resursov RF, 2014, 384 p.

2. Rzhhevskiy V.V., Novik G. Ya. *Osnovy fiziki gornyykh porod: uchebnik dlya vuzov*. 4-e izd. Fundamentals of physics of rocks: Textbook for high schools, 4th edition), Moscow, Nedra, 1984, 359 p.

3. Tangaev I.A. *Energoemkost' protsessov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh* (Energy content of mineral mining and processing operations), Moscow, Nedra, 1986, 231 p.

4. Kurilko A.C. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya na fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyykh porod* (Experimental research of effects of freezing–thawing cycles on physico-mechanical properties of rocks), Yakutsk, Izd-vo SO RAN, 2004, 153 p.

5. Zakharov E. V. *Vliyanie znakoperemennykh temperaturnykh vozdeystviy na energoemkost' protsessa drobleniya gornyykh porod* (Alternating temperature effects on energy content of rock crushing), Candidate's thesis, Yakutsk, 2012, 120 p.

6. Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., Alarcón J. C., 2013, Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 167. pp. 117–127.

7. Xian Biao Mao, LianYing Zhang, Ai Hong Lu Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2009. Vol. 52, Issue 3, pp. 641–646.

8. Rutter E. H. The influence of interstitial water on the rheological behaviour of calcite rocks. *Tectonophysics*. 1972. Vol. 14 (1), pp. 13–33.

9. Rutter E. H. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks. *International Journal of Geotectonics and Tectonophysics*. 1974. Vol. 22, pp. 311–334.

10. Ermolovich E.A., Ovchinnikov A.V. *Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoy promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: Materialy 11 Mezhdunarodnoy konferentsii*. Pod red. R.A. Kovaleva (Social, Economic and Environmental Problems in Mining, Construction and Power Engineering: The 11th International Conference Proceedings. Kovalev R.A. (Ed.)), Tula, TulGU, 2015, pp. 180–183.

11. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti. GOST 12248-2010* (Soils. Methods of laboratory testing of strength characteristics and deformability. State Standart 12248-2010), Moscow, MNTSK, 2011, 156 p.

12. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* (Methods to determine mechanical properties of soil. State-of-the-art), Penza, PGUAS, 2008, 696 p.