

С.А. Козырев, И.А. Аленичев

**ВЛИЯНИЕ ОБВОДНЕННОСТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД КОАШВИНСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Получены значения скоростей продольных и поперечных волн для водонасыщенных апатит-нефелиновых руд с различным содержанием P_2O_5 . Выявлены закономерности увеличения скоростей упругих волн с ростом обводненности. Рассчитаны динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона. Получена закономерность снижения прочностных характеристик для сухих и водонасыщенных образцов апатит-нефелиновых руд.

Ключевые слова: обводненность, прочностные характеристики, динамические характеристики, динамический коэффициент Пуассона, коэффициент открытой пористости.

В последние годы резко осложнились горно-геологические условия отработки Хибинских апатит-нефелиновых месторождений в частности Коашвинского месторождения АО «Апатит». С понижением горных работ увеличился объем поступающих дренажных вод, а с ним и выход негабаритных фракций на рудных горизонтах карьера [1]. Зачастую при производстве БВР не учитываются такие моменты как степень обводненности, содержание P_2O_5 в отбываемой руде, а используются усредненные параметры для всех условий, что ведет к разным конечным результатам. Поэтому необходимо определить, как обводненность влияет на динамические и прочностные характеристики апатит-нефелиновых руд с различным содержанием P_2O_5 с целью дальнейшего улучшения качества взрывных работ на карьере.

Для проведения исследований было отобрано 4 вида апатит-нефелиновой руды на дне карьера в пределах 500 м:

1. сетчато-полосчатая апатит-нефелиновая, бедная руда. Апатит присутствует в качестве цемента и тонких прослоев, содержание P_2O_5 – 5–7 %.
2. полосчатая апатит-нефелиновая руда тонко-мелкозернистая, содержание P_2O_5 – 13–15 %.
3. пятнисто-полосчатая апатит-нефелиновая руда мелкозернистая, плотная, содержание P_2O_5 – 23–25 %.

4. богатая крупнозернистая апатит-нефелиновая руда, содержание $P_2O_5 > 30\%$.

Анализ качества проведен на нейтронно-активационной установке «Восточного» рудника. Из каждого вида руды путем распиливания были получены цилиндры размерами примерно 200×200 мм из которых на установке «Бур № 9» выбуривали керны, используя алмазную коронку внутренним диаметром 45 мм. Керновые пробы распиливали с примерным отношением высоты к диаметру равным двум ($h/d=2$) на станках с алмазными пилами так, чтобы торцевые поверхности были строго параллельны друг другу.

Испытания проводили в два этапа. Первым было определение скоростей упругих колебаний и расчет динамических характеристик в образцах с естественной влажностью, и в образцах подвергнутых водонасыщению в течение 7 дней (максимальный про-

межуток времени между взрывами на карьерах АО «Апатит»).

До начала испытаний были определены плотности (методом гидростатического взвешивания) и значения коэффициента открытой пористости для каждого вида руды (рис. 1, 2). Установлено, что при увеличении содержания P_2O_5 , увеличивается плотность породы. Коэффициент открытой пористости растет до значения 0,93 при содержании P_2O_5 равном 24 %, далее пористость снижается.

Исследования динамических характеристик проводились в соответствии со стандартами, ГОСТ 23829-79,

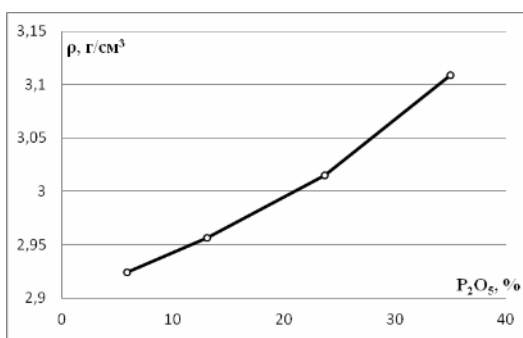


Рис. 1. Изменение плотности в зависимости от содержания P_2O_5 в породе

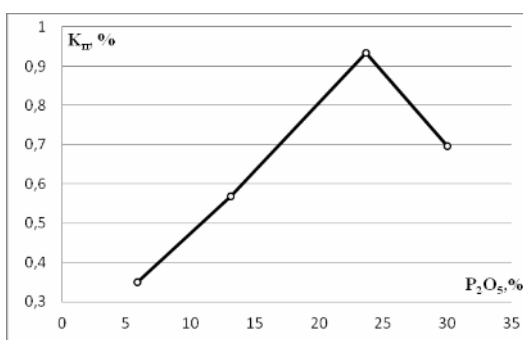


Рис. 2. Зависимость коэффициента открытой пористости от содержания P_2O_5

ГОСТ 21153.7-75 [4, 7, 8] которые распространяются на твердые горные породы с коэффициентом крепости по Протодяконову f не менее 0,5 (прочность при одноосном сжатии не менее 50-80 кг/см²) и устанавливают основные положения по отбору проб, перечень основного оборудования и общие требования к методам физических испытаний.

Для получения более надежных данных использовали несколько приборов для определения продольных и поперечных волн:

- 1) Ультразвуковой дефектоскоп УКБ-1М.
- 2) Импульсный ультразвуковой дефектоскоп STARMANS DIO 1000 PA.

Результаты скоростей измерений усредняли и вычисляли динамический модуль упругости (E_d) и динамический коэффициент Пуассона (μ) по зависимостям, представленным в работе [2, 3].

Результаты испытаний отражены в табл. 1, 2.

По результатам полученных данных строили зависимости скоростей прохождения упругих волн и коэффициента Пуассона от содержания P_2O_5 в сухих и водонасыщенных образцах апатит-нефелиновых руд (рис. 3,4 соответственно).

Как видно из рисунка 3 скорости прохождения продольных и поперечных волн в сухих образцах породы уменьшаются с увеличением содержания P_2O_5 на всем протяжении, до того момента, как содержание P_2O_5 достигает 24 %. При визуальном осмотре образцов отмечаем, что в основном они представлены мелкозернистым апатитом (от сетчатого до пятнисто-полосчатого). После график меняет направление и в образцах с содержанием примерно 30 % скорости продольных волн по своим значениям становятся схожи со скоростями в образцах с содержанием апатита примерно 5–7 %. В данных образцах апатит присутствует в виде крупных зерен.

При насыщении водой скорость прохождения продольных волн увеличивается во всех представленных типах руды. Особо отчетливый скачок скорости наблюдался в образцах пятнисто-полосчатой

Таблица 1

Результаты испытаний образцов руды с естественной влажностью

Содержание P_2O_5	V_p , км/с	V_s , км/с	μ_d	E_d , ГПа
5–7	5,465	3,25	0,226	74,93
13–15	5,261	3,105	0,232	70,28
23–25	5,005	2,927	0,239	63,60
>30	5,463	3,13	0,255	76,48

Таблица 2

Результаты испытаний водонасыщенных образцов руды

Содержание P_2O_5	V_p , км/с	V_s , км/с	μ_d	E_d , ГПа
5–7	5,86	3,195	0,288	76,09
13–15	5,67	3,065	0,293	71,86
23–25	6,062	2,84	0,359	65,62
>30	5,95	3,055	0,320	76,64

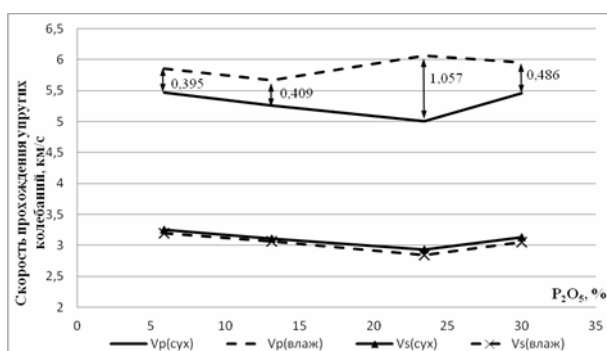


Рис. 3. Зависимость скорости прохождения упругих волн от содержания P_2O_5 в сухих и водонасыщенных образцах апатит-нефелиновых руд

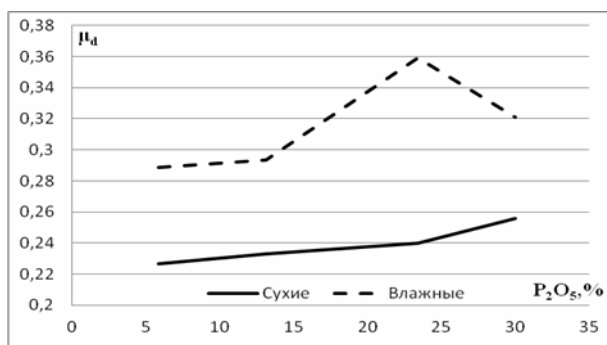


Рис. 4. Зависимость коэффициента Пуассона от содержания P_2O_5 в сухих и водонасыщенных образцах апатит-нефелиновых руд

руды. Максимальная разница в скорости прохождения волны по сравнению с сухими образцами составила 1,057 км/с. Как известно скорость прохождения продольной волны в воде 1,5 км/с, поэтому вода, заполняя поры, усиливает сигнал прохождения волны настолько больше, насколько пористее тот или иной образец. Однако скорость поперечных волн снизилась, это связано с тем, что вода не пропускает поперечные волны.

Таким образом, напрашивается вывод о том, что при увеличении размеров зерен апатита скорость прохождения волн будет увеличиваться, это объясняется тем, что мелкозернистая структура гораздо сильнее замедляет (поглощает) прохождение упругих ко-

лебаний. При водонасыщении значения продольных скоростей увеличиваются прямо пропорционально значениям коэффициента открытой пористости.

Повышение содержания P_2O_5 приводит к росту коэффициента Пуассона (рис. 4). В водонасыщенном состоянии коэффициент Пуассона увеличивается во всех видах руды и ведет себя в соответствии с изменением коэффициента открытой пористости.

Увеличение содержания P_2O_5 в руде приводит к снижению модуля упругости в сухих образцах, а при водонасыщении модуль упругости практически не изменяется, и сопоставим с сухими образцами.

Второй этап заключался в определении прочностных характеристик водонасыщенных апатит-нефелиновых руд с различным содержанием P_2O_5 . Для этого, из тех же образцов были изготовлены цилиндры примерным отношением высоты к диаметру равным ($h/d=1$) (45x45 мм) с отшлифовкой торцов на шлифовальном станке с целью придания параллельности торцевым поверхностям образца. Половина образцов, так же как и при определении прохождения упругих волн были подвержены замачиванию в течение 7 дней. Затем были проведены их испытания на одноосное сжатие (измерение максимального значения разрушающего давления, приложенного к плоским торцам правильного цилиндрического образца через плоские стальные плиты) и растяжение (измерение максимального значения разрушающего давления методом диаметрального сжатия) на установке MTS 816 Rock Test System. Испытания проводились в соответствии со стандартами, ГОСТ 21153.0-75, ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 21153.3-85 [4, 5, 6].

Результаты проведенных испытаний отражены в таблице 3, а так же построены графики зависимостей пределов прочности на сжатие и растяжение от содержания P_2O_5 для сухих и водонасыщенных образцов (рис. 5, 6).

Таблица 3

Результаты испытаний на сжатие и растяжение сухих и водонасыщенных образцов руды

Содержание P_2O_5	Сухие		Водонасыщенные	
	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{рас}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{рас}$, МПа
5–7	123,69	13,95	118,26	12,43
13–15	101,63	10,25	99,53	9,93
23–25	102,00	10,19	97,44	9,67
>30	61,27	9,17	56,63	7,72

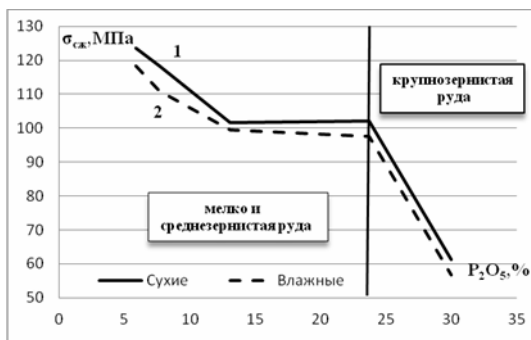


Рис. 5. Зависимость предела прочности на сжатие от содержания P_2O_5

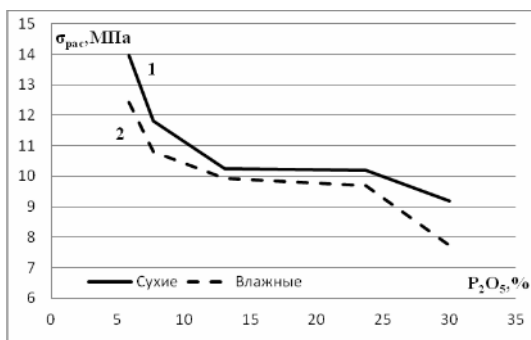


Рис. 6. Зависимость предела прочности на растяжение от содержания P_2O_5

По данным графикам отчетливо можно судить о снижении прочности на сжатие и растяжение в сухих и водонасыщенных образцах с увеличением содержания P_2O_5 . Прочность снижается равномерно во всех образцах до уровня, при котором процентное содержание P_2O_5 примерно соответствует 13-14%. Далее график выполаживается и значительных изменений в пределах прочности не наблюдается, продолжается это до тех пор, пока содержание P_2O_5 не достигнет 23-24%, после чего продолжается нисходящее движение прочностей. Поскольку содержание апатита и размер его зерен влияют на прочностные характеристики, логично предположить, что начиная с уровня P_2O_5 равным 24%, апатит становится крупнозернистым и неспособен выдержать больших нагрузок, вероятно, это связано с тем, что крупнозернистый апатит имеет менее прочную связь зерен, чем мелкозернистый.

Снижение значений прочностей в водонасыщенных образцах (рис. 5,6, кривая 2) можно объяснить, используя заключения и выводы, сделанные в работе [9]. Прочность пород на одноосное сжатие и отрыв снижается с ростом диэлектрической проницаемости насыщающей жидкости. Высокая диэлектрическая постоянная жидкости (воды) означает, что жидкость имеет большой дипольный момент, что ведет к сильной адсорбции жидкости полярными частицами, сцепление между частицами в присутствии таких жидкостей ослабляется и, следовательно, напряжение разрушения снижается.

В нашем случае адсорбция воды на поверхности частиц нарушает связность зерен, что создает условия для скольжения кристаллов относительно друг друга и снижения прочностных характеристик породы.

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено:

— при увеличении содержания P_2O_5 , увеличивается плотность руды.

— с ростом содержания P_2O_5 до уровня 24 % коэффициент открытой пористости повышается, далее пористость снижается.

— с увеличением размеров зерен апатита скорость прохождения волн будет увеличиваться.

— при водонасыщении значения продольных скоростей увеличиваются прямо пропорционально значениям коэффициента открытой пористости.

— увеличение содержания P_2O_5 приводит к росту коэффициента Пуассона. В водонасыщенном состоянии коэффициент Пуассона увеличивается во всех типах руд на 25-30 %.

— увеличение содержания P_2O_5 в руде приводит к снижению модуля упругости в сухих образцах, а при водонасыщении модуль упругости практически не изменяется, и сопоставим с сухими образцами.

— прочностные характеристики снижаются с увеличением содержания P_2O_5 .

— начиная с содержания P_2O_5 равного 24 % и выше, апатит становится крупнозернистым и неспособен выдержать больших нагрузок.

— адсорбция воды на поверхности частиц нарушает связность зерен, что создает условия для скольжения их относительно друг друга и что приводит к еще большему снижению прочностных характеристик руды по сравнению с сухим состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев С.А., Аленичев И.А. К вопросу влияния гидрогеологических условий Кошвинского месторождения ОАО «Апатит» на степень обводненности горных пород // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ. — Апатиты; СПб.: «Реноме», 2013. — С.356-362.

2. Турчанинов И.А., Воларович М.П. и др. Атлас физических свойств минералов Хибинских месторождений. Изд-во «Наука», Ленингр. Отд., Л., — 1975. — С.71.

3. Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология Нефтегазовое и горное дело. — 2010 — №5. — С.82-85.


4. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. Введ. с 01.07.1975 до 01.07.1986. М., Изд-во стандартов, 3 с., 1975.

5. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Взамен ГОСТ 21153.2-75. Введ с 19.06.84 до 01.07.91. М., Изд-во стандартов, 8 с., 1984.

6. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. Взамен ГОСТ 21153.3-75, ГОСТ 21153.4-75. Введ с 01.01.87 до 01.01.92. М., Изд-во стандартов, 18 с., 1987.

7. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введ. С 01.07.1976 до 01.07.1986. М., Изд-во стандартов, 8 с., 1976.

8. Горбачевич Ф.Ф. Определение скорости распределения продольных и поперечных колебаний в образцах горных пород // Методические рекомендации. — Апатиты: КНЦ РАН, 1982. — 15 с.

9. Карманский А.Т. Экспериментальное обоснование прочности и разрушения насыщенных осадочных горных пород // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Спб. — 2010. — С.39. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Сергей Александрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, skozirev@goi.kolasc.net.ru,

Аленичев Игорь Алексеевич – ведущий технолог, igor-alenichev@ya.ru, Горного института Кольского научного центра Российской академии наук.



UDC 622.235: 622.023

THE EFFECT OF WATER FLOODING ON THE STRENGTH AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE KOASHVA APATITE-NEPHELINE ORES

Kozyrev S.A., Head of laboratory, Dr.Sci (Eng.), skozirev@goi.kolasc.net.ru, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,

Alenichev I.A., leading technologist, igor-alenichev@ya.ru, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia.

Values of the P and S-waves velocity have been obtained for flooding apatite-nepheline ore with different content of P_2O_5 . Regularities have been revealed of elastic wave velocities increase when flooding increasing. Dynamic elastic modulus and Poisson's ratio have been calculated. Regularity of reducing strength characteristics for dry and water-saturated samples of apatite-nepheline ores has been obtained.

Key words: flooding, strength characteristics, dynamic characteristics, Poisson's ratio, coefficient of open porosity.

REFERENCES

1. Kozyrev S.A., Alenichev I.A. *K voprosu vliyaniya gidrogeologicheskikh uslovij koashvinskogo mestorozhdeniya OAO «Apatit» na stepen obvodnennosti gornyh porod* (To the question of the influence of hydrogeological conditions Masvingo field of OJSC "Apatit" to the extent of water cut of rocks) // *Monitoring prirodnyh i tehnogennyh processov pri vedenii gornyh rabot*. 2013. pp. 356–362.
2. Turchaninov I.A., Volarovich M.P. i dr. *Atlas fizicheskikh svoystv mineralov hibinskih mestorozhdenij* (Atlas of physical properties of minerals of the Khibiny deposits) // *Izd-vo «Nauka», Leningr. otd., Leningrad, 1975. pp. 71.*
3. Belyukov N.L., Evseev A.V. *Sopostavlenie uprugih svoystv gornyh porod* (Comparison of elastic properties of rocks) // *Vestnik permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologiya neftegazovoe i gornoe delo*. 2010. No 5. pp. 82–85.
4. Gost 21153.0-75. *Porody gornye. Otbor prob i obshie trebovaniya k metodam fizicheskikh ispytaniy*. Vved. s 01.07.1975 do 01.07.1986. M., Izd-vo standartov, 3 p., 1975.
5. Gost 21153.2-84. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii*. Vzamen gost 21153.2-75. Vved s 19.06.84 do 01.07.91. M., Izd-vo standartov, 8 p., 1984.
6. Gost 21153.3-85. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii*. Vzamen gost 21153.3-75, Gost 21153.4-75. Vved s 01.01.87 do 01.01.92. M., Izd-vo standartov, 18 p., 1987.
7. Gost 21153.7-75. *Pporody gornye. Metod opredeleniya skorostej rasprostraneniya uprugih prodolnyh i poperechnyh voln*. Vved. s 01.07.1976 do 01.07.1986. M., Izd-vo standartov, 8 p., 1976.
8. Gorbacevich F.F. *Opredelenie skorosti raspredeleniya prodolnyh i poperechnyh kolebanij v obrazcah gornyh porod* (Definition of speed of distribution of longitudinal and transverse vibrations in rock samples) // *Metodicheskie rekomendacii. Apatity: KNC RAN, 1982. 15 p.*
9. Karmanskij A.T. *Eksperimentalnoe obosnovanie prochnosti i razrusheniya nasyshennyh osadochnyh gornyh porod* (Experimental study of strength and fracture saturated sedimentary rocks) // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni d.t.n. Spb. 2010. p. 39.*