

**ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИХ ИЗ РАВНОКОМПОНЕНТНОГО
ОБЪЁМНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ
В РАЗНОКОМПОНЕНТНОЕ**

В публікації викладена фізична сутність Наукового відкриття, зареєстрованого Міжнародною академією авторів наукових відкриттів та винаходів, Міжнародною асоціацією авторів наукових відкриттів та Російською академією природних наук від 7 липня 2005 року (диплом № 280).

**REGULARITIES OF GAS PERMEABILITY IN THE ROCKS
AT THEIR TRANSITION FROM UNIFORM-COMPONENT
TO DIFFERENT-COMPONENT VOLUMETRIC STRESSED STATE**

The paper describes physical essence of scientific discovery that was registered by International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, International Association of Authors of Scientific Discoveries and Inventions and Russian Academy of Natural Sciences in July 7, 2005 (diploma No. 280).

Газовая проницаемость горных пород – один из показателей, интегрально характеризующий фильтрационные свойства газовых коллекторов при различном геомеханическом состоянии трещинно-поровых сред.

Количественно газовую проницаемость пористых сред оценивают коэффициентом K , определяемым расчетным путем по формуле Дарси. Для одномерной ламинарной фильтрации газообразных флюидов с учетом их сжимаемости расчетная формула имеет вид

$$K = \frac{2\mu Q l P_0}{S(P_{вх}^2 - P_{вых}^2)}; \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость газа, Н·с/м²; Q – объемный расход фильтрующегося газа м³/с; l – длина пути фильтрации, м; P_0 – барометрическое давление, Н/м²; S – площадь потока фильтрации, м²; $P_{вх}$ и $P_{вых}$ – давления газа на входе и выходе зоны фильтрации, Н/м².

Численные значения этого параметра необходимо знать не только как одной из характеристик коллекторских свойств пористых сред, но и для решения многих прикладных задач в области вентиляции шахт, дегазации пластов, борьбы с выбросами угля, породы и газа, добычи метана и др.

Проницаемость различных сред может отличаться в десятки, сотни раз, что связано с их структурными особенностями. Во столько же раз коэффициент газопроницаемости может изменяться в одних и тех же средах при изменении их напряженно-деформированного состояния. Напряжения в уравнение Дарси в явном виде не входят, но существенно от них зависят. Поэтому, чтобы опреде-

лить количественную взаимосвязь между этими параметрами, необходимо, в каждом конкретном случае, наряду с определением коэффициента газовой проницаемости, замерять или рассчитывать величину напряжений.

Подобные исследования проводились различными авторами как в природных условиях, так и на образцах. Причем напряжения в массиве задавали обычно в соответствии с теорией Динника: вертикальная составляющая приравнивалась гравитационной $\sigma_z = \mathcal{H}$, а горизонтальные $\sigma_x = \sigma_y = \lambda \mathcal{H}$, где λ - коэффициент бокового отпора. В лабораторных условиях моделировали такое же соотношение компонент главных напряжений.

Полученные результаты однозначно подтверждали, что с увеличением напряжений коэффициент газопроницаемости снижается по криволинейной (параболической) зависимости.

На рис. 1 показаны экспериментальные данные изменения газопроницаемости образцов горных пород с повышением напряжений, а на рис. 2 – в функции соотношений боковых напряжений, ортогональных направлению движения фильтрующегося потока.

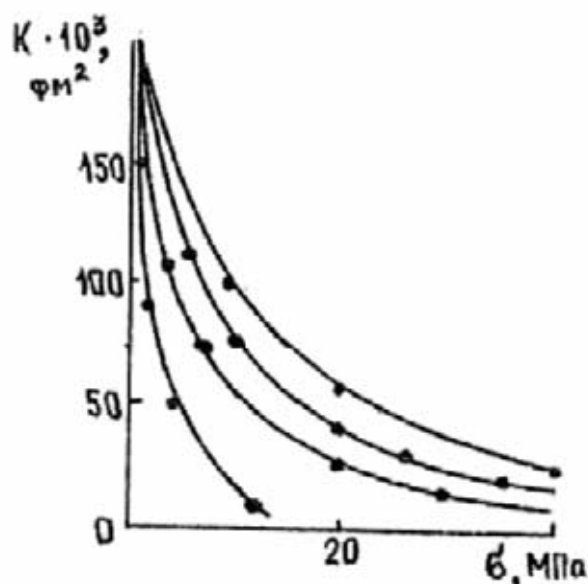


Рис. 1 – Изменение проницаемости кернов песчаника при изменении внешней нагрузки

Здесь максимальные значения коэффициентов K соответствуют разгруженным образцам, а минимальные – при равнокомпонентном объемном сжатии, когда $\lambda = 1$ и $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Отсюда видно, что соотношение компонент поля напряжений столь же существенно влияет на коэффициент газопроницаемости, как и величина самих напряжений.

В 1958 году шведским геомехаником Н. Хастом впервые были измерены численно неравные между собой горизонтальные напряжения, значительно превышающие соответствующую вертикальную (гравитационную) составляющую действующего поля напряжений. В дальнейшем результатами многочисленных экс-

периментальных исследований, выполненных практически во всех геологических регионах Земли, было подтверждено наличие разнокомпонентного характера распределения главных напряжений в горных породах. На базе обобщения мировых экспериментальных исследований была сформулирована и получила признание геодинамическая модель напряженного состояния верхних слоев земной коры, в которой, наряду с доказательством разнокомпонентности действующих полей напряжений, не исключалось существование равнокомпонентного или близкого к нему напряженного состояния в массивах горных пород.

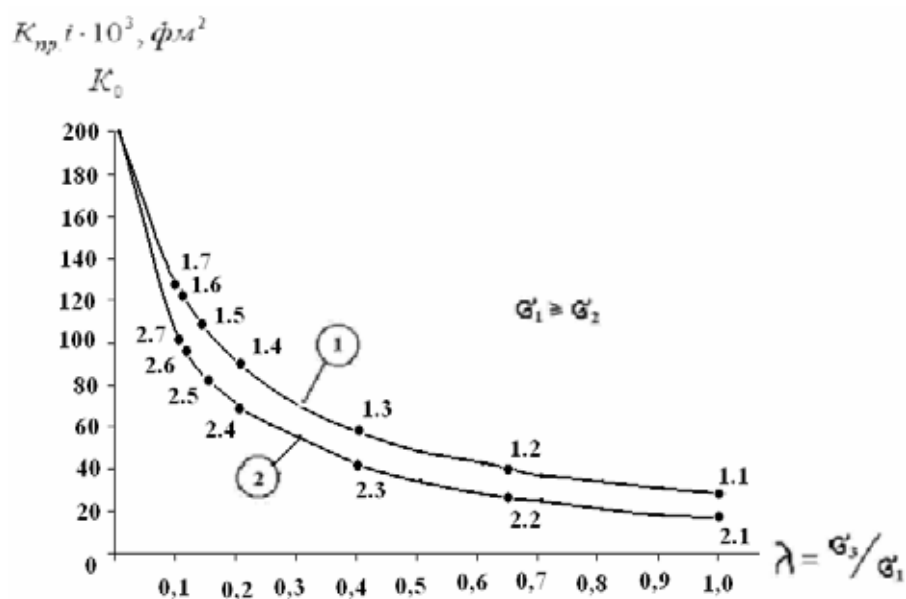


Рис. 2 – Изменение газовой проницаемости образцов горных пород при разнокомпонентной внешней нагрузке

При разнокомпонентности главных напряжений, соответствующей геодинамической модели их распределения в горных породах, когда горизонтальные составляющие действующих полей напряжений не являются производными от вертикальных компонент, а зависят, кроме давления вышележащих пород, от ряда природных факторов, обусловленных тектоническими, гидрогазодинамическими, термическими и другими силовыми полями, понятие «боковой отпор» (как единственная причина возникновения горизонтальных напряжений) не соответствует физическому смыслу, постулируемому гравитационной гипотезой. Поэтому более информативным и близким к реальным условиям при оценке разнокомпонентности действующих полей напряжений в породных массивах является использование соотношения большей составляющей (σ_1) к меньшей (σ_3) в виде коэффициента $\psi = \sigma_1 / \sigma_3 > 1$.

Известно, что физико-механические свойства всех представительных типов горных пород взаимосвязаны с их напряженным состоянием. Условия равнокомпонентного объемного сжатия являются оптимальными для уплотнения трещинно-поровых сред за счет уменьшения их внутренней пустотности, тогда как при разнокомпонентном поле сжимающих напряжений эта пустотность,

служащая, в частности, фильтрационными каналами в флюидонасыщенных средах, при прочих равных условиях, увеличивается вследствие активизации деформационных процессов, структурирующих фильтрационную систему в разнокомпонентно напряженной влагогазонасыщенной среде.

Численные значения вертикальной компоненты (σ_z) в большинстве определений (около 85 %) близки к гравитационному уровню при усредненном объемном весе $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$. Больше по величине, как правило, является одна из горизонтальных составляющих, в 1,5-2,2 раза превышающая соответствующую вертикальную компоненту. Вторая горизонтальная составляющая по численным значениям меньше вертикальной компоненты и составляет от 50 до 90 % ее величины. Для наглядности полученные экспериментальные данные в функции глубины от земной поверхности представлены на рисунке, из которого следует, что изменение численных значений главных составляющих тензора напряжений удовлетворительно (относительная погрешность не превышает 25 %) аппроксимируется линейными зависимостями.

Анализ результатов оценки пространственной ориентации главных составляющих поля напряжений показал, что в преобладающем большинстве определений направление вертикальной компоненты σ_x субортогонально дневной поверхности (отклонения не превышают 15°), а траектории действия главных горизонтальных составляющих не постоянны и изменяются от близких к широтным до меридианных направлений. Сопоставление пространственной ориентации больших составляющих поля напряжений с простираем крупных геологических нарушений показало, что в ряде регионов они могут совпадать по направлению, хотя наблюдается и значительное (до 45°) расхождение.

Для оценки достоверности полученных методом локального гидроразрыва напряжений выполнены сопоставления с численными значениями составляющих поля напряжений, определенных методом разгрузки в торцевом варианте (метод ВНИМИ) на шахтах им. Скочинского, им. Поченкова, им. Гагарина и двух бокситовых рудниках северного Урала (рис. 3). Определено, что расхождения по численным значениям главных компонент поля напряжений в среднем не превышали 25 %, а по пространственной ориентации $\pm 6^\circ$ (рис. 4).

Формула открытия сформулирована следующим образом: экспериментально установлена неизвестная ранее закономерность изменения газовой проницаемости горных пород при переходе их из объемного равнокомпонентного напряженного состояния в разнокомпонентное, заключающаяся в том, что при трансформации допредельного равнокомпонентного напряжённого состояния горных пород в разнокомпонентное газовая проницаемость возрастает в направлении градиента газового давления до гиперболической зависимости в функции изменения степени разнокомпонентности главных напряжений, ортогональных движению фильтрующегося газового потока, и обусловлена активизацией деформационных процессов, структурирующих фильтрационную систему разнокомпонентно напряженной газонасыщенной среды.

Научная значимость установленного открытия заключается в принципиально новом представлении об изменении газовой проницаемости разнокомпо-

нентно напряженных сред в зависимости от степени разнокомпонентности главных напряжений, ортогональных направлению движения фильтрующегося газового потока.

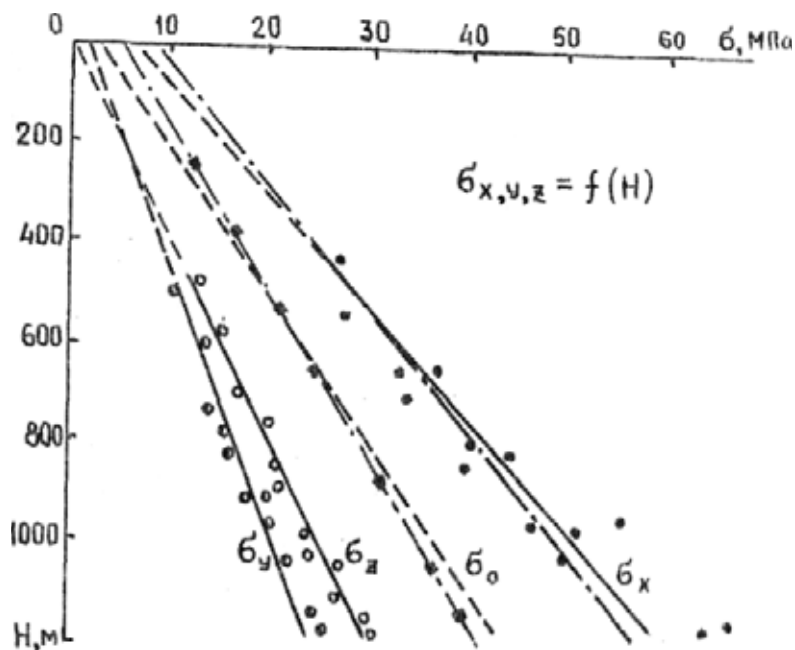


Рис. 3 – Результаты натуральных исследований

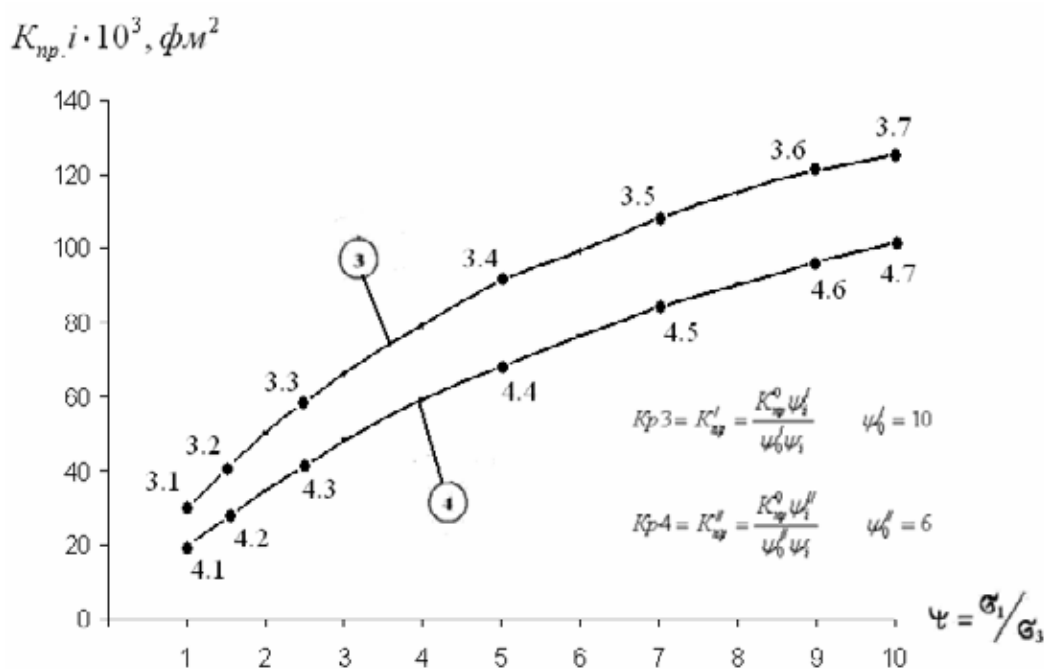


Рис. 4 – Изменение газовой проницаемости образцов горных пород при переходе из равнокомпонентного объемного напряженного состояния в разнокомпонентное

Практическая значимость открытия заключается в том, что оно дает основу для прогнозирования фильтрационных процессов, происходящих в объемно напряженных газоносных средах и для разработки рациональных технических

решений по повышению эффективности дегазационных мероприятий с учетом величины и характера распределения главных составляющих действующего поля напряжений.

Таким образом, изучены и раскрыты природа и механизм изменения газовой проницаемости объемно напряженных горных пород при переходе их из равнокомпонентного напряженного состояния в разнокомпонентное. Доказано, что при трансформации допредельного равнокомпонентного напряженного состояния в разнокомпонентное вокруг горных выработок и пройденных дренажных скважинах, в газоносном породном массиве происходит процесс активизации деформаций, приводящих к изменению геомеханического состояния горных пород. При этом в зонах активизации деформационных процессов происходит раскрытие существующих и образование новых трещин природного и техногенного характера, в целом структурирующих фильтрационную систему объемно напряженной газонасыщенной среды.

Процесс трансформации фильтрационной системы в газоносном породном массиве сопровождается возрастанием газовой проницаемости и газоотдачи вмещающих пород к поверхностям стока в направлении градиента газового давления. Доказано, что возрастание фильтрационных параметров газоносных пород в зонах активизации деформационных процессов зависит от степени разнокомпонентности главных напряжений, обуславливающих геомеханическое состояние газоносного массива горных пород. Это подтверждено комплексом лабораторных и шахтных исследований, выполненных авторами в глубоких шахтах Донбасса.