

## ВЛИЯНИЕ КАТАГЕНЕЗА НА ВНУТРЕНнюю УДЕЛЬную ПОВЕРХНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Показано, що збільшення відносної вологості у міру збільшення ступеня катагенетичних змін пісковиків відбувається за рахунок підвищення вмісту зв'язаної води. Аналітично досліджено вплив внутрішньої питомої поверхні порід на залишкову водонасиченість. Зроблено висновок, що питома поверхня порід (пісковики, алевроліти) під час катагенетичних перетворень має зменшуватись зі зниженням пористості

## INFLUENCE OF KATAGENEZIS ON ROCKS INTERNAL SPECIFIC SURFACE

It is shown that the relative humidity increase of sandstones with the increase of catagenesis degree changes occurs due to the increase of the bounded moisture content. Influence of rocks internal specific surface on residual water saturation has been analytically investigated. A conclusion has been done, that the internal specific surface of rocks (sandstones, aleurolites) during catagenesis transformations must decrease with the reducing of porosity

Внутренняя удельная поверхность является одним из параметров, количественно характеризующих структуру порового пространства горных пород. Она представляет собой отношение поверхности пор породы к её объёму или массе. В первом случае она характеризует поровое пространство единицы объёма и называется объёмной удельной поверхностью, а во втором – поровое пространство единицы массы породы, соответственно – массовая удельная поверхность. С этим параметром тесно связана сорбционная способность различных материалов, которая определяется совокупным влиянием удельной поверхности и сорбционной активности материала [1]. Имеются сведения относительно влияния степени изменения угольного вещества на его внутреннюю удельную поверхность - считается, что при региональном метаморфизме с уменьшением выхода летучих веществ и ростом содержания углерода, увеличивается объём микропор и, соответственно, растёт сорбционная метаноёмкость [2]. Вопросы, связанные с влиянием постдиагенетических изменений горных пород на их внутреннюю удельную поверхность, до настоящего времени не рассматривались. В этой связи определённый интерес представляет изучение влияния степени катагенетических изменений горных пород на величину их внутренней удельной поверхности.

Используя внутреннюю удельную поверхность, Е.С. Ромм [3], основываясь на данных Ф.И. Котяхова, выполнил оценку возможного содержания связанной влаги в песчаниках. Для расчётов была взята известная формула К.Г. Оркина [4]:

$$\tau = \frac{K_{ov} \cdot K_n}{s_v}, \quad (1)$$

где  $\tau$  - толщина условного плёночного слоя связанной воды, м;  $K_{oc}$  - коэффициент остаточной водонасыщенности, доли единицы;  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, доли единицы;  $S_v$  - объёмная удельная поверхность,  $m^2/m^3$ .

Исходя из того, что, по результатам исследования течения жидкостей в сверхтонких щелях [3], толщина плёнки воды, обладающей аномальными свойствами, в отличие от воды свободной, не должна превышать  $1,6 \cdot 10^{-8} m$ , именно это значение принято для расчётов в качестве толщины условного плёночного слоя связанной воды. Удельная поверхность, принятая Е.С. Роммом [3] для расчётов, по данным Ф.И. Котяхова, для алевролитов и смешанных литологических разностей пород не превышает  $2 \cdot 10^5 m^2/m^3$ , а пелиты характеризуются большими значениями удельной поверхности, тогда как для псаммитов эти значения не должны превышать  $10^5 m^2/m^3$ . Следует отметить, что подобные значения приводят и другие исследователи, в частности А. Л. Рубинштейн и В.Н. Кобранова [5,6]. Указанные значения удельной поверхности и толщины слоя связанной воды позволили Е.С. Ромму [3] определить абсолютное содержание связанной воды для алевролитов в количестве  $3 \cdot 10^{-3} m^3/m^3$  и её относительное содержание к объёму пор (отношение объёма воды к пористости породы). По его расчётам породам с пористостью 20 % соответствует относительное содержание связанной воды 1,5%, а породы с пористостью 5 % должны содержать не более 6 % связанной воды. Тогда, как сам Е.С. Ромм [3] указывает, что в реальных условиях породы, характеризующиеся пористостью около 5 %, содержат до 50 – 70 % связанной воды. В работе [5] отмечается, что значения удельной поверхности, определённые различными способами, значительно расходятся, что показывает на условность этого параметра и на зависимость его величины от методики определения. Действительно, если проанализировать данные Ф.И. Котяхова, можно увидеть, что объёмной удельной поверхности  $1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5 m^2/m^3$  соответствует массовая удельная поверхность (при средней плотности пород  $2500 kg/m^3$ ) всего лишь  $40 - 80 m^2/kg$ , что очень мало, и, по меньшей мере, на один порядок занижено. В действительности Ф.И. Котяховым при расчёте удельной поверхности принято, совершенно условно, что в псаммитах содержание пелитовой фракции составляет до 20 % с диаметром частиц  $10^{-5} m$  (0,01 мм), а средний диаметр псаммитовых частиц, составляющих не менее 80 %, равен 0,55 мм [7]. То есть, подобные расчёты, помимо их условности, применимы только для рыхлых крупнозернистых образований.

В более поздних работах [1,8,9], в том числе и самой В.Н. Кобрановой [10], содержатся сведения о более высоких значениях внутренней удельной поверхности пород. В работах [8,9] приведены данные экспериментальных исследований удельной поверхности выбросоопасных песчаников Донбасса хроматографическими методами тепловой десорбции. Удельная массовая поверхность изменялась в пределах  $(0,7 - 2,9) \cdot 10^3 m^2/kg$ , достигая на единичных образцах значений (4,3; 5,1; 7,15)  $10^3 m^2/kg$ . В этих же работах [8,9] приведена ссылка на

экспериментальные результаты Брукса и Пурселла, которые удельную поверхность песчаников оценивают в пределах  $0,5 \cdot 10^3 - 6,0 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ . В.Н. Кобранова в работе 1986 г. [10] приводит данные о пределах изменения удельной поверхности нефтегазовых коллекторов близких к  $0,5 \cdot 10^3 - 2,0 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ . С.С. Ефимов [1] указывает удельную поверхность песчаников равную  $4,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ , определённую по изотермам полимолекулярной адсорбции согласно уравнения БЭТ – Брунауэра, Эммета, Теллера. Для песчано-алевритовых пород среднего и верхнего карбона Шебелинского газового месторождения А.А. Ханин [4] приводит значение общей удельной поверхности, определённой сорбционным методом по аргону,  $23730 - 28830 \text{ см}^2 / \text{см}^3$ , то есть, в пределах  $0,96 \cdot 10^3 - 1,16 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ . Основываясь на приведенных данных и, приняв в качестве среднего значения массовой удельной поверхности  $1 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ , повторив расчёты количества связанной воды по методике Е.С. Ромма [3], получим относительное содержание связанной воды в количестве 20 % для породы с пористостью 20 % и 80 % - для породы с пористостью 5 %. Что в полной мере соответствует имеющимся многочисленным данным о коллекторских свойствах терригенных пород [3,11]. В поровом пространстве, упоминавшихся выше песчано-алевритовых породах Шебелинского месторождения, по данным [4], содержится до 90 % остаточной воды.

Очевидно, что при прочих равных условиях, остаточная водонасыщенность и удельная поверхность должны быть связаны прямо-пропорциональной зависимостью и об этом свидетельствуют многочисленные литературные источники [3,5,6,10]: чем больше удельная поверхность, тем больше содержание в породе связанной влаги. Степень заполнения пор влагой алевритовых и пелитовых пород, как рыхлых [12], так и сцементированных [8], близка к 100 %. Увеличение остаточной водонасыщенности, по мере уменьшения пористости в процессе постдиагенетических преобразований горных пород [13], должно было бы сопровождаться увеличением их внутренней удельной поверхности. О возрастании удельной поверхности с увеличением остаточного водонасыщения прямо указывается в работе [10]. Однако, в этом случае, правильнее было бы говорить об увеличении остаточного водонасыщения с возрастанием удельной поверхности. Если рассматривать эти показатели с точки зрения причинно-следственной связи, то возрастание остаточного водонасыщения должно быть следствием, причиной которого является увеличение внутренней удельной поверхности. В этой же работе [10] отмечается, что чем старше породы и глубже их залегание, то есть значительнее действие на них давления и температуры, тем меньше обычно их удельная поверхность. Исходя из этого, уменьшение пористости в процессе постдиагенетических преобразований должно сопровождаться уменьшением внутренней удельной поверхности. Приняв толщину условного плёночного слоя равной  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  и преобразовав упомянутую выше формулу К.Г. Оркина (1) в предположении, что поры породы насыщены влагой на 100 %,

получим следующую формулу для определения объёмной удельной поверхности:

$$s_v = 6,25 \cdot 10^7 \cdot K_n, \quad (2)$$

где  $S_v$  - объёмная удельная поверхность,  $m^2/m^3$ ,  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, выраженный в долях единицы. Коэффициент в уравнении (2) имеет размерность  $m^{-1}$  или  $m^2/m^3$ . Разделив правую часть равенства (2) на плотность породы, получим формулу для определения массовой удельной поверхности. При средней плотности породы равной  $2500 \text{ кг}/m^3$  формула примет вид:

$$S_m = 2,5 \cdot 10^4 \cdot K_n, \quad (3)$$

где  $S_m$  - массовая удельная поверхность,  $m^2/\text{кг}$ ;  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, выраженный в долях единицы. Коэффициент в уравнении (3) имеет ту же размерность, что и массовая удельная поверхность -  $m^2/\text{кг}$ .

Приведенные уравнения (см. формулы 2,3) зависимости удельной поверхности и открытой пористости свидетельствуют об уменьшении объёмной удельной поверхности по мере снижения пористости от 10% до 1% с  $6,25 \text{ м}^2/\text{м}^3$  до  $0,625 \text{ м}^2/\text{м}^3$  (рис.1) и массовой удельной поверхности с  $2,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$  до  $0,25 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$  (рис.2). Отметим, что приведенные данные получены в предположении заполнения пор влагой близком к 100 % и полученные графики (пунктирные линии на рис. 1,2) должны отражать характер изменения удельной поверхности алевролитов в зависимости от их пористости, степень насыщения объёма водой которых по данным [8], равна или близка к предельной, составляя 95-100 %. Для оценки удельной поверхности песчаников, используем, полученную для Донбасса [13], зависимость (4) степени заполнения пор песчаников влагой от коэффициента открытой пористости, которая для низкопористых песчаников, по своей сути, отражает характер связи количества слабосвязанной (сорбированной и микрокапиллярной) влаги и открытой пористости.

$$G = 90,56 - 11,57K_n + 0,54K_n^2, \quad (4)$$

где  $G$  - степень заполнения пор песчаников влагой, %;  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, %.

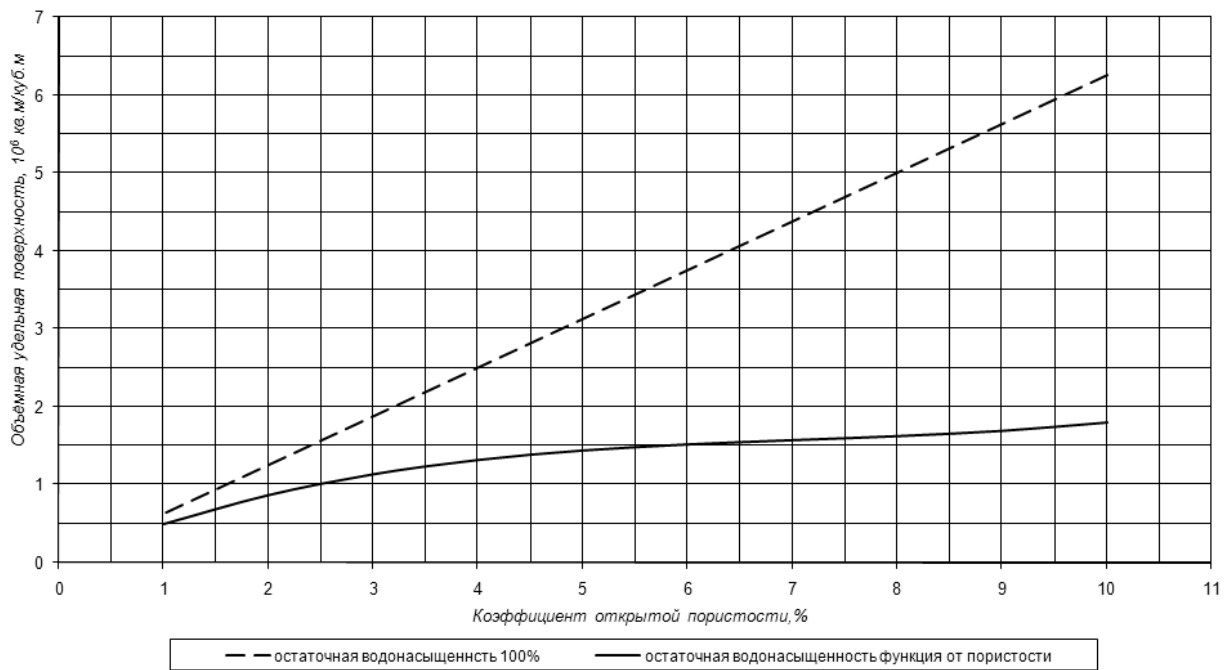


Рис. 1 – Зависимость объёмной удельной поверхности от коэффициента открытой пористости

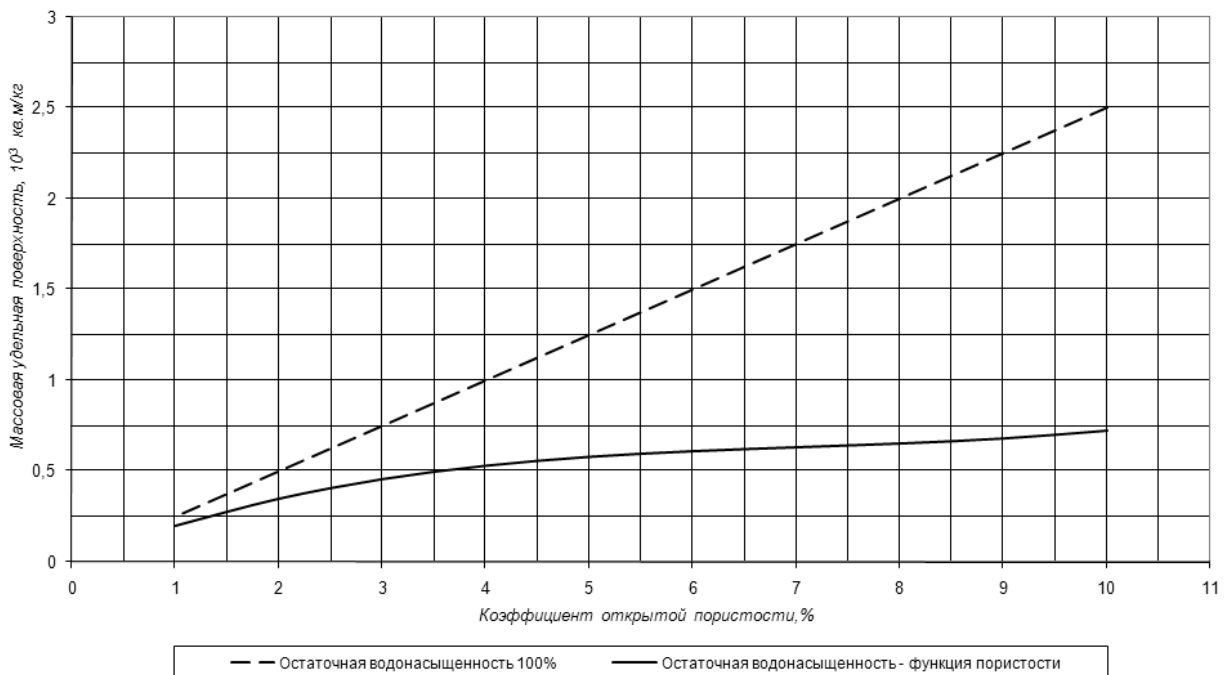


Рис. 2 – Зависимость массовой удельной поверхности от коэффициента открытой пористости

Следует также отметить, что абсолютное содержание связанной влаги, которая содержится в песчаниках, закономерно убывает с 29 кг на  $1 \text{ м}^3$  при открытой пористости 10 %, до 8 кг на  $1 \text{ м}^3$  при открытой пористости 1 %. То

есть, при содержании в песчаниках только связанной воды, при отсутствии воды свободной (гравитационной), их абсолютная (массовая) влажность уменьшается с 1,16 % до 0,32 %. Это иллюстрируется графиками (рис.3,4), которые, соответственно, построены по формулам (5) и (6). Зависимость содержания влаги (см.рис. 3) от коэффициента открытой пористости получена как произведение коэффициента открытой пористости на степень заполнения пор влагой на основании зависимости (4):

$$v = 9,056K_n - 1,157K_n^2 + 0,054K_n^3, \quad (5)$$

где  $v$  - содержание связанной влаги,  $кг/м^3$ ;  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, %.

Показатель массовой влажности, характеризующий в данном случае только содержание связанной влаги в зависимости от изменения коэффициента открытой пористости (см.рис.4), может определяться по формуле (6), которая получена путём деления уравнения (5) на плотность пород, принятой равной в среднем  $2500 кг/м^3$ :

$$W_{св} = 0,362K_n - 0,046K_n^2 + 0,002K_n^3, \quad (6)$$

где  $W_{св}$  - показатель массовой влажности, характеризующий количество связанной влаги, %;  $K_n$  - коэффициент открытой пористости, %.

Пунктирной линией на графике (см.рис.4) показано изменение полной влагоёмкости песчаников, то есть массовая влажность при полном заполнении пор водой для различных значений открытой пористости. Область между линиями, характеризующими изменение полной влагоёмкости и изменение максимальной молекулярной влагоёмкости, отражает максимально возможное количество свободной влаги, которое способна вмещать порода при различных величинах открытой пористости. Этот же объём, при отсутствии влаги свободной, может быть занят газом, то есть, по сути, указанный объём характеризует потенциальную эффективную пористость.

Зависимость (4) также может быть использована для определения внутренней удельной поверхности песчаников. С учётом этой зависимости формулы для определения внутренней удельной поверхности песчаников принимают следующий вид:

$$S_v = (56,6K_n - 723,1K_n^2 + 3375K_n^3) \cdot 10^6 \quad (7)$$

$$S_m = (22,64K_n - 289,24K_n^2 + 1350K_n^3) \cdot 10^3 \quad (8)$$

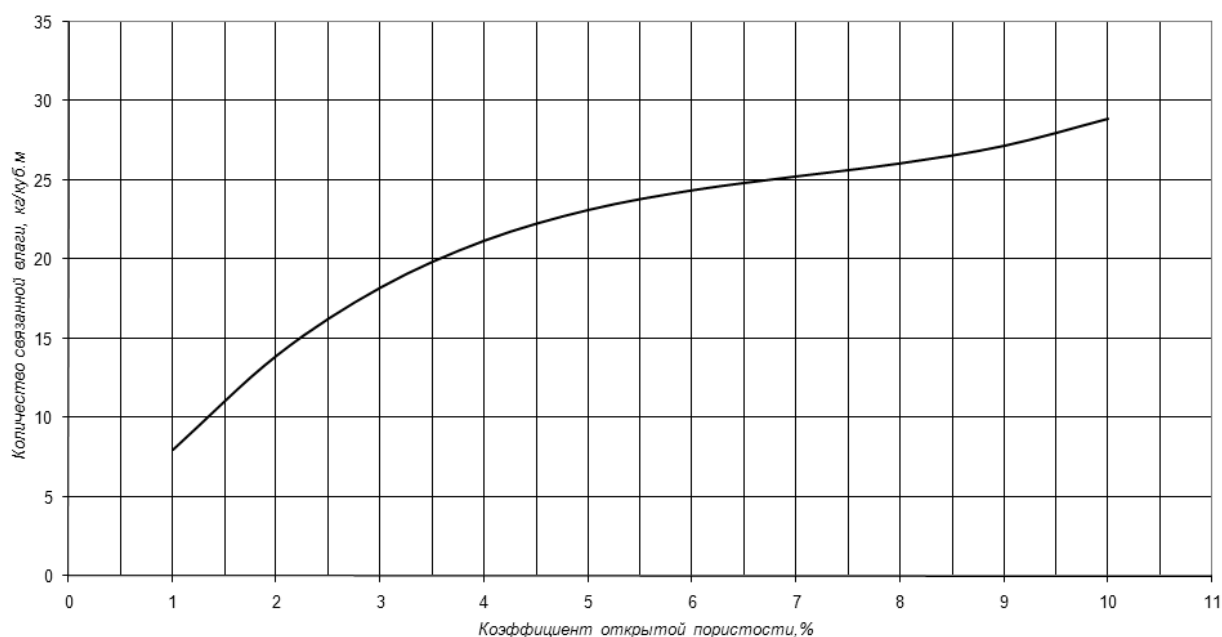


Рис. 3 – Зависимость содержания связанной влаги от коэффициента открытой пористости песчаников Донбасса

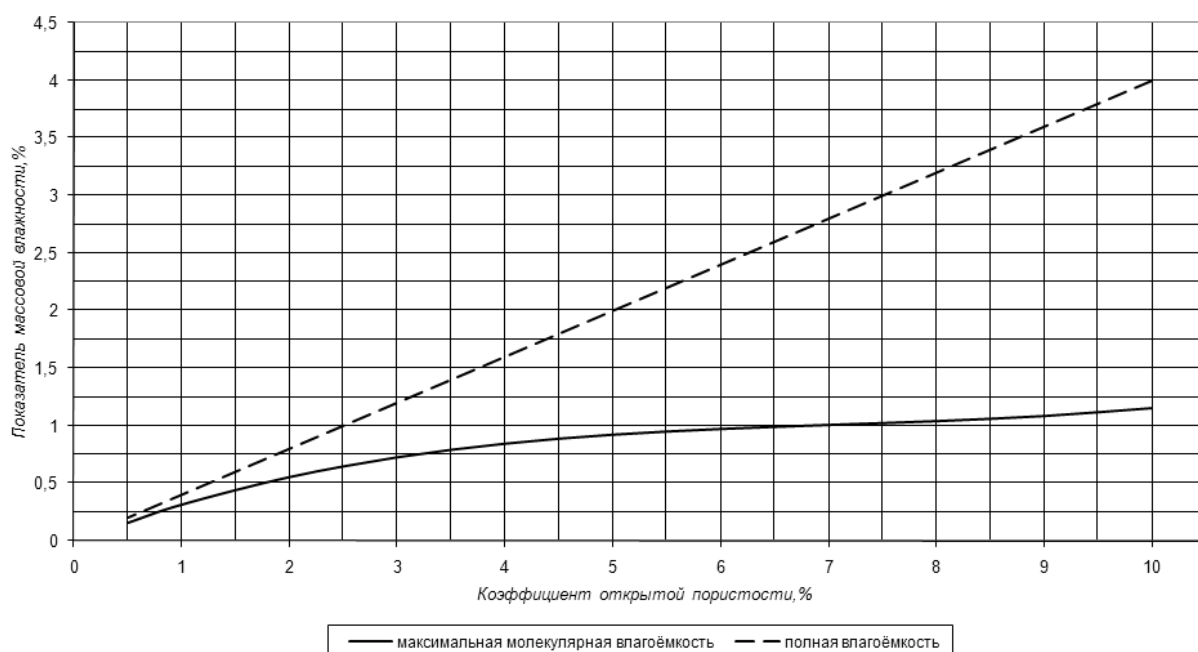


Рис. 4 – Зависимость полной влагоёмкости и максимальной молекулярной влагоёмкости песчаников Донбасса от коэффициента открытой пористости

Полученные уравнения (7) и (8) свидетельствуют об уменьшении удельной поверхности песчаников со снижением пористости. Так, при снижении пористости от 10 % до 1 %, которое сопровождается увеличением остаточной водонасыщенности с 29 % до 80 % согласно зависимости (4), объёмная удельная поверхность должна уменьшаться с  $1,81 \cdot 10^6 \text{ м}^2 / \text{м}^3$  до  $5,0 \cdot 10^5 \text{ м}^2 / \text{м}^3$  (см. рис. 1 сплошная линия), массовая удельная поверхность – с  $7,25 \cdot 10^2 \text{ м}^2 / \text{кг}$  до 2,0

$10^2 \text{ м}^2 / \text{кг}$  (см. рис. 2 сплошная линия). В противном случае, если предположить, что внутренняя удельная поверхность, как объёмная, так и массовая остаются неизменными по мере уменьшения пористости с 10 % до 1 %, тогда процесс снижения пористости должен сопровождаться уменьшением слоя плёночной влаги - в 10 раз для алевролитов - до  $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}$  и в 3,63 раза - до  $4,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , для песчаников, что представляется маловероятным. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в процессе катагенетических изменений наблюдается уменьшение внутренней удельной поверхности горных пород, как объёмной, так и массовой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов С.С. Влага гигроскопических материалов.- Новосибирск: Наука, 1986.-160.
2. Эттингер И. Л., Шульман Н. В. Распределение метана в порых ископаемых углей.- М.: Наука, 1975.- С. 80.
3. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород.- М.: Недра, 1966.-384 с.
4. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение.-М.: Недра,1969.-368 с.
5. 14. Кобранова В.Н., Лепарская Н.Д. Определение физических свойств горных пород.-М.: Гостоптехиздат, 1957.-160 с.
6. 24. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород.-М.: Гостоптехиздат, 1962.-492 с.
7. Геология нефти. Т.1 Основы геологии нефти/под ред. Н. А. Еременко.- М.: Гостоптехиздат, 1960.- 592 с.
8. Абрамов Ф.А., Шевелёв Г.А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора.-К.: Наук.думка, 1972.- 98 с.
9. Булат А.Ф., Звягильский Е.Л., Лукинов В.В., Перепелица В.Г., Пимоненко Л.И., Шевелёв Г.А. Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда.-К.: Наук.думка, 2008.- 412 с.
10. Кобранова В.Н. Петрофизика.-М.: Недра, 1986.-392 с.
11. Федешин В.О. Низкопористі породи-колектори газу промислового значення.-К.: УкрДГРІ, 2005.- 148 с.
12. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах.-М.: Недра, 1986.-160 с.
13. Безручко К. А. Газонасыщенность и пористость выбросоопасных песчаников // Уголь Украины.- 1994.- №1.- С. 48-49.

**УДК 622.411.332:551.2**

П.С. Пашенко, мл. науч.сотр. (ИГТМ НАН Украины)

### **МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА В СТРАТИГРАФИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

Наведена методика і результати дослідження виділення зон скоплення метану в стратиграфічному інтервалі порід, які залягають полого

### **METHOD OF SELECTION OF AREAS OF ACCUMULATION OF METHANE IN STRATYGRAFY INTERVAL OF THE ROCKS**

A method and results of research of selection of areas of accumulation of methane in the stratygrafycheskom interval of declivous bedding breeds is resulted

Проблема выделения и прогнозирования зон скопления метана в углепородном массиве для последующего его извлечения с целью утилизации и повышения безопасности на угольных шахтах Донбасса является в настоящее время достаточно актуальной. Энергетический кризис в стране и в мире является