



К. А. БЕЗРУЧКО,
доктор геол. наук
(ИГТМ им. Н. С. Полякова
НАН Украины)

УДК 553.9:552.513.08:622.02

Определение параметров границы коллектор–экран для низкопористых песчаников угленосной толщи

Для низкопористых и низкопроницаемых песчаников угленосной толщи между коэффициентом остаточной водонасыщенности и коэффициентом открытой пористости установлена обратно пропорциональная связь, которая аппроксимируется уравнением линейного вида. Определены фильтрационно-емкостные параметры границы коллектор–экран для углевмещающих пород в Центральном районе Донбасса: коэффициент открытой пористости 4,5–5,6 %, коэффициент остаточной водонасыщенности 50 %, коэффициент абсолютной проницаемости $5 \cdot 10^{-17}$ – $1 \cdot 10^{-16}$ м² (0,05–0,10 мД).

Ключевые слова: угленосная толща, песчаники, открытая пористость, остаточная водонасыщенность, проницаемость.

Контактная информация: gvrvg@meta.ua

Постановка проблемы. Добыча угля на угольных шахтах в процессе их эксплуатации и после завершения проведения очистных работ практически постоянно сопряжена с выделением метана в выработанное пространство. В целом проблема метана угольных месторождений включает в себя три важнейших аспекта: обеспечение безопасного ведения горных работ по добыче угля, использование метана в качестве ценного углеводородного сырья и охрана окружающей среды путем снижения вредных выбросов в атмосферу. Успешное решение этой актуальной проблемы за счет комплексной добычи и утилизации угольного метана позволит существенно решить экономические, экологические и социальные вопросы. Метан – основной компонент газов угольных месторождений, поскольку почти вся угленосная толща горных пород насыщена метаном, в том числе низкопористые коллекторы, в которых он находится в малоподвижном или связанном состоянии.

Коллектор – это горная порода, геологофизические свойства которой обеспечивают физическую подвижность угле-

водородов в пустотном пространстве [1]. По определению Методических указаний [2], порода-коллектор – горная порода, способная аккумулировать и отдавать углеводороды при перепаде пластового давления. Главным признаком коллектора является способность фильтровать флюиды, т. е. иметь эффективную пористость, которую определяют пористость и водонасыщение.

Выделение промышленных коллекторов длительное время проводилось по значению коэффициента проницаемости свыше 10^{-15} м² (1 мД). В настоящее время разделение пород на коллекторы и неколлекторы в нефтегазовой геологии осуществляют посредством разных статистических зависимостей между такими параметрами, как пористость (открытая, эффективная и динамическая), проницаемость (абсолютная, эффективная и относительная), водонасыщение и взаимосвязи отдельных из них с продуктивностью интервалов разреза [2, 3]. Используются практически все характеристические признаки, которые предопределяют качество коллектора преимущественно по такому комплексу исследований:

- определение абсолютной, эффективной и фазовой проницаемости;
- определение открытой, эффективной и динамической пористости;
- исследование методом капиллярметрии с получением кривых зависимости водонасыщения от перепада давления вытеснения;
- определение остаточного водо- и газонасыщения;
- измерение электрических параметров – удельного электрического сопротивления водонасыщенных пород, параметров пористости и насыщения;
- изучение порометрических характеристик пород и т. д.

По полученным результатам определяются корреляционные зависимости между петрофизическими свойствами пород и обосновываются предельные значения фильтрационно-емкостных параметров коллекторов.

Цель работы. Определение количественных параметров фильтрационно-емкостных свойств границы коллектор–экран для углеводенасыщающих пород на основе исследования остаточной водонасыщенности и открытой пористости низкопористых и низкопроницаемых песчаников угленосной толщи.

Основные результаты. Учитывая, что влага, содержащаяся в поровом пространстве горных пород, неоднородна (может быть разделена на свободную, способную перемещаться под действием гравитационных сил, и связанную поверхностью твердой фазы), потенциальная газоемкость горной породы контролируется (определяется) количеством влаги, которую поверхность твердых частиц способна связать и удерживать, а точнее она является тем остаточным объемом пор, который не занят связанной влагой. Другими словами, связанная влага, содержащаяся в порах горных пород, определяет емкость порового пространства, недоступное для газа, как бы дополняя твердую фазу породы, уменьшая ее пористость, в то время как свободная (гравитационная) влага может вытесняться газом при определенных условиях, а при достаточном объеме и давлении последнего может сформироваться газовая залежь.

Один из показателей фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, наряду с пористостью и проницаемостью, – остаточная водонасыщенность. Под этим термином понимают такую насыщенность продуктивных пород смачивающей фазой, при которой последняя, в случае существующих в пласте капиллярных давлений, теряет подвижность. Этот показатель, отражающий количество воды, связанной твердой поверхностью, широко используется в качестве одной из основных характеристик коллекторских свойств горных пород нефтяных и газовых месторождений. Физически остаточная вода – вода, содержащаяся в породах, которая удерживается в пористой среде поверхностно-молекулярными и капиллярными силами, т. е. адсорбционная (мономолекулярного и полимолекулярного слоев) и микрокапиллярная.

Во время исследований естественной влажности песчаников Донбасса, в связи с прогнозом

их выбросоопасности, было установлено, что степень заполнения пор песчаников влагой, в отличие от их массовой влажности, возрастает по мере уплотнения и сокращения пористости в процессе постдиагенетических изменений угленосных отложений, в среднем от 27,6 % (зона развития углей марки Д) до практически 100 % (зона развития углей марки Т) [4–6]. Между степенью заполнения пор песчаников влагой G и коэффициентом открытой пористости K_{Π} обнаруживается обратная связь, которая аппроксимируется эмпирическим уравнением [5, 6] (рис. 1)

$$G = 90,56 - 11,57 K_{\Pi} + 0,54 K_{\Pi}^2. \quad (1)$$

Аналогичные уравнения регрессии были получены во время исследования корреляционных зависимостей между физическими параметрами при изучении низкопористых коллекторов в Днепровско-Донецкой впадине [3], а именно между коэффициентом остаточной водонасыщенности $K_{o,в}$ и коэффициентом открытой пористости K_{Π} для Краснозаводского и Свиридовского месторождений соответственно (см. рис. 1):

$$K_{o,в} = 97,91 - 17,34 K_{\Pi} + 0,87 K_{\Pi}^2; \quad (2)$$

$$K_{o,в} = 94,94 - 18,60 K_{\Pi} + 1,20 K_{\Pi}^2. \quad (3)$$

Методика опробования и установления степени заполнения пор влагой горных пород в связи с оценкой выбросоопасности предусматривала герметизацию проб после их отбора для транспортировки и хранения с последующим определением влажности в лабораторных

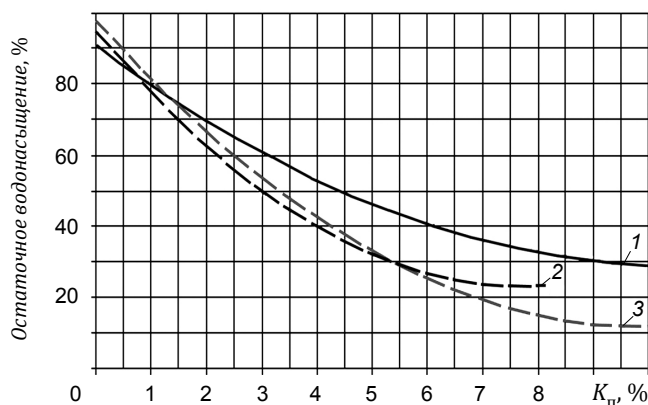


Рис. 1. Зависимость остаточной водонасыщенности низкопористых песчаников от коэффициента открытой пористости: 1 – Донецкий бассейн; 2 и 3 – Краснозаводское и Свиридовское месторождения Днепровско-Донецкой впадины.

условиях методом высушивания до постоянной массы. Стандартная методика определения остаточной водонасыщенности предусматривает насыщение образцов влагой при непосредственном контакте с водой, удаление гравитационной (свободной) влаги методом центрифугирования, а также определение влажности методом высушивания до постоянной массы. Таким образом, зависимость (1) характеризует степень заполнения пор песчаников влагой в естественном залегании, а зависимости (2) и (3) – максимальную молекулярную влагоемкость, т. е. способность пород связывать и удерживать воду.

Сходство уравнения связи между естественной влагонасыщенностью и коэффициентом открытой пористости песчаников Донбасса с зависимостями остаточной влагонасыщенности от открытой пористости, полученными для песчаников Днепровско-Донецкой впадины, свидетельствует о том, что при низких коэффициентах открытой пористости (менее 4,4 %) большая часть порового пространства (свыше 50 %) занята слабосвязанной влагой (адсорбционной и микрокапиллярной). Другими словами, ухудшение коллекторских свойств горных пород по мере возрастания степени постдиагенетических изменений происходит за счет сокращения объема порового пространства (снижение открытой пористости) и увеличения содержания слабосвязанной влаги. Это, в конечном итоге, определяет резкое снижение проницаемости по мере сокращения порового пространства и объясняет логарифмический (экспоненциальный) характер связи между проницаемостью и пористостью как открытой, так и эффективной.

Исходя из того что большая часть порового пространства песчаников средней и поздней стадий катагенеза сформирована порами размером 10^{-8} – 10^{-6} м, а часть поровых каналов размером 10^{-7} м и меньше составляет до 50 % [7], можно считать, что доля капиллярной влаги в формировании остаточной водонасыщенности значительна и остаточная водонасыщенность определяется, главным образом, размерами поровых каналов, что и приводит к увеличению последней с уменьшением пористости в процессе постдиагенетических изменений.

Действительно, доказанное ранее в работах [4–6] возрастание естественной водонасыщен-

ности песчаников в процессе постдиагенетических изменений, обусловленное повышением содержания связанной влаги, не может быть связано с увеличением содержания адсорбционной влаги, поскольку содержание глинистых минералов существенно не меняется. Их качественные изменения направлены на ухудшение сорбционных свойств, внутренняя удельная поверхность породы под действием температуры и давления уменьшается [8]. Следовательно, естественная водонасыщенность песчаников в процессе постдиагенетических преобразований увеличивается за счет содержания микрокапиллярной влаги вследствие изменения структуры порового пространства, а именно уменьшения общего количества крупных пор (размером 10^{-6} м и более) и увеличения количества поровых каналов размером 10^{-7} м и менее. Сокращение объема порового пространства в результате уменьшения размера пор фактически не вызывает сомнений.

Возвращаясь к уравнениям связи остаточной водонасыщенности от коэффициента открытой пористости песчаников, полученных для Донбасса (1) и для отдельных месторождений Днепровско-Донецкой впадины (2) и (3), следует отметить, что коэффициенты корреляции последних достаточно высоки (–0,933 и –0,828) (табл. 1), тогда как корреляционное отношение для Донбасса составляет 0,6. Это объясняется тем, что, с одной стороны, в пределах одного участка связи между разными физическими параметрами имеют более тесный характер, а с другой – на песчаниках с более высокой открытой пористостью сказывается влияние свободной (гравитационной) воды в поровом пространстве.

Чем выше значение коэффициента открытой пористости, тем значительнее влияние свободной влаги и тем в большей степени разнятся показатели остаточной и относительной водонасыщенности. Это хорошо иллюстрируется кривыми зависимостей (см. рис. 1) – с увеличением коэффициента открытой пористости кривая зависимости 1 значительно расходится с кривыми зависимостей 2 и 3 и отклоняется вверх, в область более высоких значений степени заполнения пор влагой.

Для проверки последних выводов проведен корреляционно-регрессионный анализ водонасыщенности и открытой пористости в пре-

Таблица 1

Участок исследований	Уравнение связи	K_{Π} / диапазон изменения K_{Π} , %	Количество проб	Коэффициент корреляции
Краснозаводское месторождение	$K_{o.b} = 97,91 - 17,34K_{\Pi} + 0,87K_{\Pi}^2$	- / 1,1–13,1	36	-0,933
Свиридовское месторождение	$K_{o.b} = 94,94 - 18,6K_{\Pi} + 1,2K_{\Pi}^2$	- / 2,6–8,4	52	-0,828
Шахта им. М. И. Калинина	$K_{o.b} = 74,99 - 5,53K_{\Pi}$	3,0 / 1,3–4,4	11	-0,986
Шахта им. К. А. Румянцева	$K_{o.b} = 73,33 - 5,11K_{\Pi}$	2,4 / 1,1–4,6	12	-0,915
Шахта им. Ф. Э. Дзержинского	$K_{o.b} = 128,68 - 13,94K_{\Pi}$	4,5 / 4,2–5,3	11	-0,966
Центральный район (без шахты им. Ф. Э. Дзержинского)	$K_{o.b} = 72,70 - 4,10K_{\Pi}$	3,0 / 1,1–6,5	33	-0,719
Центральный район в целом	$K_{o.b} = 69,08 - 2,12K_{\Pi}$	3,3 / 1,1–6,5	44	-0,388

делах отдельных шахтных полей (см. табл. 1). Поскольку основная задача данных исследований – установление граничных параметров коллекторских свойств породного массива, в качестве объектов исследований выбраны низкопористые песчаники Центрального геолого-промышленного района Донбасса. Исследованы физические свойства песчаников на шахтах им. М. И. Калинина, им. К. А. Румянцева, им. А. И. Гаевого, им. В. И. Ленина, им. Ф. Э. Дзержинского, «Торецкая».

Корреляционно-регрессионный анализ водонасыщенности и открытой пористости на отдельных шахтах показал, что коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связи этих характеристик в пределах одного шахтного поля, достаточно высоки – более 0,9, а все полученные уравнения связи подобны (см. табл. 1). Песчаники на шахте им. Ф. Э. Дзержинского характеризуются более высокими значениями открытой пористости по сравнению с песчаниками на соседних шахтах, поэтому коэффициенты уравнения регрессии, рассчитанные по результатам опробования на этой шахте, также отличаются по сравнению с данными остальных шахт.

В отличие от полученных ранее уравнений параболического вида в целом для месторождений Донбасса и Днепроовско-Донецкой впадины (формулы (2) и (3)), зависимости указанных параметров на локальных участках для от-

дельных шахт аппроксимируются линейными уравнениями. Зависимость остаточной водонасыщенности от коэффициента открытой пористости для низкопористых песчаников Центрального района в целом (см. табл. 1) также имеет линейный характер. Коэффициент корреляции, рассчитанный по фактическим данным для всех шахт составляет -0,388, без учета шахты им. Ф. Э. Дзержинского, равен -0,719.

Аналогичные результаты получены для низкопористых песчаников на участке Бутовский-Глубокий-2 Донецко-Макеевского района (табл. 2). Проведенный отдельно для каждого песчаника корреляционно-регрессионный анализ остаточной водонасыщенности и открытой пористости также свидетельствует о существовании обратной связи между исследуемыми показателями. Значения коэффициентов корреляции, характеризующих тесноту этой связи, в целом варьируют в пределах от -0,27 до -0,87. В ряде случаев они недостаточно высоки, что объясняется значительным разбросом фактических данных, по-видимому, обусловленным изменчивостью вещественного состава некоторых песчаников и, как следствие, неоднородности их свойств. Эта связь для всех без исключения песчаников аппроксимируется схожими линейными уравнениями общего вида $K_{o.b} = a - bK_{\Pi}$, в котором коэффициент a изменяется в пределах 75–85, а коэффициент b составляет от 1 до 3 (см. табл. 2).

Таблица 2

Индекс песчаника (количество определений)	K_{Π} / диапазон изменения K_{Π} , %	$K_{o.B}$ / диапазон изменения $K_{o.B}$, %	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
$N_3^1 S N_3^2$ (16)	4,27 / 1,91–6,85	71,74 / 58,24–83,33	$K_{o.B} = 85,52 - 3,21K_{\Pi}$	–0,54
$n_1^1 S N_3^H$ (55)	4,72 / 2,32–10,65	70,32 / 45,45–81,25	$K_{o.B} = 75,98 - 1,16K_{\Pi}$	–0,30
$n_1^B S n_1^1$ (42)	4,13 / 2,00–7,14	71,16 / 61,97–80,95	$K_{o.B} = 78,56 - 1,80K_{\Pi}$	–0,41
$n_1^0 S n_1^1$ (25)	4,74 / 3,11–7,02	72,27 / 62,16–82,35	$K_{o.B} = 84,69 - 2,63K_{\Pi}$	–0,60
$n_1^B S n_1^0$ (5)	4,64 / 3,90–5,35	71,52 / 67,96–74,28	$K_{o.B} = 76,71 - 1,08K_{\Pi}$	–0,27
$n_1^H S n_1^B$ (11)	4,70 / 2,53–7,95	70,89 / 62,88–77,77	$K_{o.B} = 83,42 - 2,70K_{\Pi}$	–0,87
$N_1^6 S n_1$ (211)	4,99 / 2,18–9,13	69,69 / 47,61–89,47	$K_{o.B} = 81,09 - 2,29K_{\Pi}$	–0,49
$N_1^3 S N_1^6$ (172)	4,51 / 2,00–7,76	72,77 / 50,00–90,00	$K_{o.B} = 83,38 - 2,35K_{\Pi}$	–0,39
В целом по участку (537)	4,70 / 1,91–10,62	70,90 / 45,45–90,00	$K_{o.B} = 80,86 - 2,12K_{\Pi}$	–0,44

Полученные уравнения зависимости остаточной водонасыщенности низкопористых песчаников от их коэффициента открытой пористости (см. табл. 1) позволяют оценить нижний предел параметров коллекторских свойств для песчаников Центрального района, когда породный массив утрачивает способность фильтровать и удерживать флюиды.

Как известно, условием существования газовых залежей, исходя из относительных фазовых проницаемостей воды и газа в трехфазной системе порода–вода–газ и многочисленных эмпирических данных о газонасыщенности газовых залежей, является наличие в поровом пространстве песчаников не менее 50 % газа, т. е. поровое пространство газонасыщенных песчаников содержит 50 % газа и более [5, 6, 9]. Относительной газонасыщенности, равной 50 % согласно полученным уравнениям, соответствуют следующие значения коэффициента открытой пористости: 4,5 % – шахта им. М. И. Калинина; 4,6 % – шахта им. К. А. Румянцева; 5,6 % – шахта им. Ф. Э. Дзержинского. Следовательно, открытая пористость в пределах 4,6–5,5 % – нижний предел для коллекторов низкопори-

стой угленосной толщи в Центральном районе. При таких значениях коэффициента открытой пористости и ниже песчаник утрачивает способность фильтровать и накапливать флюиды, т. е. быть коллектором. Это значение в полной мере согласуется с определенным ранее средним значением нижней границы открытой пористости поровых коллекторов, рассчитанным по уравнению (1) для Донецкого бассейна и составляющим 4,4 % [6].

Полученное значение коэффициента открытой пористости позволяет рассчитать коэффициент абсолютной проницаемости, соответствующий такому граничному значению, которое является нижним пределом для коллекторов по этому параметру. Для расчетов использована эмпирическая формула, связывающая коэффициенты абсолютной проницаемости, открытой пористости и остаточной водонасыщенности песчаников-коллекторов [10]. Формула для расчета абсолютной проницаемости имеет вид

$$K_{\Pi} = 0,136 (K_{\Pi}^{4,4} / K_{o.B}^2),$$

где K_{Π} – коэффициент абсолютной проницаемости, 10^{-15} м².

Согласно выполненным расчетам значениям коэффициента открытой пористости (4,5–5,6 %) соответствуют значения коэффициента абсолютной проницаемости, равные $5 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ (0,05–0,10 мД), которые и являются нижним пределом для низкопористых и низкопроницаемых коллекторов в угленосной толще Центрального геолого-промышленного района.

Выводы. Для низкопористых и низкопроницаемых песчаников угленосной толщи между коэффициентом остаточной водонасыщенности и коэффициентом открытой пористости установлена обратно пропорциональная связь, которая аппроксимируется линейным уравнением общего вида $K_{0,в} = a - bK_{п}$.

На основе результатов исследования низкопористых и низкопроницаемых песчаников угленосной толщи можно установить фильтрационно-емкостные параметры границы коллектор–экран в углепородном массиве для Центрального района Донбасса. Это коэффициенты: 4,5–5,6 % – открытой пористости; 50 % – остаточной водонасыщенности; $5 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ (0,05–0,10 мД) – абсолютной проницаемости. Песчаники с параметрами фильтрационно-емкостных свойств ниже указанных и обладающие экранирующей способностью не являются коллекторами.

При проведении практических расчетов по оценке нижних пределов параметров коллекторских свойств в каждом случае целесообразно использовать статистические зависимости между этими параметрами, определенные для конкретного песчаника на отдельном участке разведки или шахтном поле, поскольку, как отмечалось выше, в пределах одного участка свя-

зи между физическими параметрами имеют более тесный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Визначення параметрів порового простору порід-колекторів. Методичні вказівки:* СОУ 73.1-41-08.11.09:2007. – Офіц. вид. – [Чинний від 2007-12-01]. – К.: Держгеолслужба України, 2007. – 12 с.
2. *Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів теригенних порід-колекторів для підрахунку загальних запасів вуглеводнів (за лабораторними дослідженнями керна). Методичні вказівки.* – [Чинний від 2006-01-01]. – К.–Львів: ДКЗ України, 2005. – 58 с.
3. *Федишин В. О.* Низькопористі породи-колектори газу промислового значення / В. О. Федішин. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 148 с.
4. *Забигайло В. Е.* Влияние постдиагенетических изменений угленосных отложений на влажность песчаников Донбасса / В. Е. Забигайло, В. В. Лукинов, К. А. Безручко // Уголь Украины. – 1990. – № 7. – С. 37.
5. *Лукинов В. В.* Газонасиченість та газонасиченість пісковиків Донбасу різного ступеня постдіагенетичних перетворень / В. В. Лукинов, К. А. Безручко // Геологія і геохімія горючих копалин. – 1993. – № 1 (82). – С. 56–60.
6. *Безручко К. А.* Газонасиченість і пористість вибросоопасных песчаников / К. А. Безручко // Уголь Украины. – 1994. – № 1. – С. 48–49.
7. *Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда* / [А. Ф. Булат, Е. Л. Звягильский, В. В. Лукинов и др.]. – К.: Наук. думка, 2008. – 412 с.
8. *Безручко К. А.* Влияние катагенеза на внутреннюю удельную поверхность горных пород / К. А. Безручко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепрпетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 161–168.
9. *Булат А.Ф.* Система «вода-газ» в массиве горных пород Донбасса / А. Ф. Булат, К. А. Безручко. – К.: Наук. думка, 2015. – 192 с.
10. *Тиаб Дж.* Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Дж. Тиаб, Э. Доналдсон. – М.: Премиум инжиниринг, 2009. – 868 с.

ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1977

В журнале № 3 в статье Ф. А. Артемова и О. И. Благова «К оценке воспламеняющей способности блуждающих токов» рассмотрена воспламеняющая способность блуждающих токов в цепях управления, имеющих контакт с горным массивом. Борьба с блуждающими токами сводится к непрерывному контролю за состоянием стыковых соединений рельсового пути, которое в процессе эксплуатации значительно изменяется. В случае использования средств и способов контроля вопрос безопасности при наличии блуждающих токов обеспечивается надежно, есть возможность расширения контактной откатки на газовых шахтах.