

УДК 553.048+622.324.5

*С.Ф. Поверенный, ст.н.с.,

**А.И. Лурье, д.г.-м.н., профессор,

***Н.Ю. Нестеренко, д.геол.н., вед.н.с.,

*Е.В. Поддубная, инженер,

*Украинский научно-исследовательский институт природных газов,

**Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,

***Львовский комплексный научно-исследовательский центр

Украинского научно-исследовательского института природных газов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГАЗОТДАЧИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПО КЕРНУ

Статья посвящена апробации методики определения коэффициента извлечения газа по керну в условиях производственной лаборатории в связи с предстоящей стандартизацией её на уровне СОУ. Выявлены возможные источники погрешностей, даны рекомендации по их устранению.

Ключевые слова: исследования керна, петрофизическое обеспечение поиска, разведки и разработки газовых залежей, коллекторские свойства горных пород, коэффициент газоотдачи.

С.Ф. Поверенный, А.И. Лурье, М.Ю. Нестеренко, О.В. Піддубна. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГАЗОВИВЛУЧЕННЯ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ЗА КЕРНОМ. Стаття присвячена апробації методики визначення коефіцієнту вилучення газу по керну в умовах виробничої лабораторії у зв'язку з наступною стандартизацією її на рівні СОУ. Виявлені можливі джерела похибок, надані рекомендації по їх усуненню.

Ключові слова: дослідження керна, петрофізичне забезпечення пошуків, розвідки і розробки газових покладів, колекторські властивості гірських порід, коефіцієнт газовивлучення.

Вступление. Сотрудниками Львовского отделения Украинского Государственного Геологоразведочного Института (УкрГГРИ) был разработан экспресс-метод определения коэффициента остаточного водонасыщения с помощью центрифугирования, введенный в действие в 2001 году [1]. Метод был апробирован на образцах кернов, отобранных из продуктивных отложений разных месторождений, и использовался в практике. В 2013 году, уже сотрудниками Львовского комплексного научно-исследовательского центра Украинского Научно - Исследовательского Института природных газов (УкрНИИГаз), был получен патент № 83619 [2] на процесс определения газоотдающих свойств пород-коллекторов, который в значительной степени представлял собой модификацию вышеупомянутого метода, приспособленную для газа. Патент содержал методику лабораторного определения коэффициента извлечения газа по керну с помощью центрифугирования.

Цель данной работы заключалась в апробации вышеупомянутой методики применительно к условиям производственной лаборатории, в связи с предполагаемой стандартизацией её на уровне СОУ. Следует отметить, что речь идёт только о лабораторных аспектах методики, то есть вопросы соответствия результатов определений фактическим коэффициентам извлечения газа из реальных продуктивных пластов не рассматриваются. При этом коэффициент газоотдачи рассматривается как такой же физический параметр, к примеру, открытая пористость или абсолютная газопроницаемость и не

зависит от технико-экономических показателей разработки залежей.

Краткая характеристика объекта исследований. При выполнении исследований были использованы образцы породы-коллектора горизонта С-5 Березовского месторождения, отобранные в скважине № 203, в интервале 4748,7-4725,6 м. Горизонт С-5 является наиболее мощным и выдержанным по площади продуктивным горизонтом месторождения, коллектора которого обеспечивают стабильные притоки газа с дебитами в сотни тысяч м³ в сутки. Коллектора горизонта представлены песчаниками от мелко- до разно-грубозернистых, мономиктовыми и олигомиктовыми. Кластическая часть сложена преимущественно кварцем с небольшой примесью полевых шпатов (обычно не сдвойникованные калишпаты), обломков пород (обычно кварциты и кремни) и единичными лейстиками мусковита. Преобладает регенерационно-кварцевый цемент в сочетании с бесцементным сочленением зёрен по конформным и инкорпорационным контактам. В подчинённом количестве присутствует неравномерно, часто сгустково распределённый каолиновый цемент и цемент доломитового состава. Содержание последнего обычно незначительное (0,4-5%), но в отдельных прослоях небольшой толщины достигает 20,1 %. Коллекторские свойства пород довольно высоки: открытая пористость – 8-16,1 %, абсолютная газопроницаемость – 2,1-538 мД, остаточная водонасыщенность – 11,1-26,9 %, относительная проницаемость – 0,45-0,98. По степени катагенетических

изменений породы относятся к зоне глубинного катагенеза (градация МК₃).

Методика определения коэффициента газоотдачи. Отобранные образцы были подготовлены согласно ГОСТ 26450.0.-85 [3], по ним было выполнено определение открытой пористости по модели пластовой воды, газопроницаемости согласно ГОСТ 26450.1.-85 – ГОСТ 26450.2.-85 [4, 5] и определение остаточной водонасыщенности согласно ГСТУ 00032626-00-025-2000 [1]. Рекомендованный контроль [6] полноты насыщения по газоволюметрическому методу не проводился в связи с отсутствием необходимого оборудования.

Образцы, по которым предварительно были определены значения остаточной водонасыщенности и рассчитан коэффициент газонасыщенности, донасыщаются керосином и центрифугируются. Методика донасыщения – согласно ГОСТ 26450.1-85 за исключением того, что на вакуумирование подают не сухой образец, а образец с остаточным водонасыщением. Режим центрифугирования и дальнейшая обработка аналогичны таковым в процессе определения остаточной водонасыщенности согласно ГСТУ 00032626-00-025-2000. Во время центрифугирования происходит ступенчатое вытеснение керосина при нарастающих давлениях вытеснения, обусловленных разными скоростными режимами центрифугирования. На каждом режиме под действием центробежной силы часть керосина вытесняется из образца, а часть остаётся в поровом пространстве. Содержание остаточной воды остаётся неизменным, поскольку центробежные силы не превышают значений, достигнутых при первом центрифугировании.

Для построения кривой капиллярного давления (ККД), представляющей собой график зависимости керосинонасыщенности от давления вытеснения, для каждого режима центрифугирования рассчитывают коэффициент текущего керосинонасыщения образца по формуле (1).

$$K_{кт} = (m_{ктв} - m_{в}/m_{кв} - m_{в}) \cdot 100 \quad (1)$$

где $K_{кт}$ - коэффициент текущей керосинонасыщенности образца, содержащего остаточную воду, %;

$m_{ктв}$ – масса керосинонасыщенного образца с остаточной водой после каждого режима центрифугирования, г;

$m_{в}$ – масса образца с остаточной водой, г;

$m_{кв}$ – масса керосинонасыщенного образца с остаточной водой до центрифугирования, г;

Давление вытеснения (p) определяется по формуле (5.2) ГСТУ 00032626-00-025-2000, с

той только разницей, что вместо плотности модели пластовой воды берут плотность керосина.

Согласно полученным данным о давлениях и насыщенныхностях, на одном графике с ККД для воды строится зависимость керосинонасыщенности от давления вытеснения $K_{кт}=f(p_T)$.

Перед построением графика рассчитываем величину $100-K_{кт}=\beta$, представляющую собой величину коэффициента вытеснения керосина. Приводим коэффициент вытеснения керосина (β) к общему объёму пор с помощью деления на пересчётный коэффициент $K=1/(1-K_{об})$, где $K_{об}$ берётся на последнем режиме центрифугирования. Получаем приведенное значение коэффициента вытеснения керосина β^* .

Для построения графика к полученным значениям β^* постоянно прибавляем величину $K_{об}$ на последнем режиме центрифугирования. Получаем значения текущего коэффициента керосинонасыщенности $K_{кт}^*$, которые непосредственно наносятся на график. ($K_{кт}^*=K_{об}+\beta^*$, где $K_{об}$ также берём на последнем режиме центрифугирования). При построении графика полученные значения $K_{кт}^*$ откладываем по шкале содержания остаточной водонасыщенности слева направо, а значения остаточной керосинонасыщенности отсчитываем по той же шкале справа налево.

К конечному участку ККД для керосина проводится прямая линия и из точки отклонения её от ККД опускается перпендикуляр на ось насыщенностей (ось абсцисс). Значение керосинонасыщенности, отвечающее основанию перпендикуляра, принимается за значение остаточной керосинонасыщенности в поверхностных условиях.

Имея значения остаточной водо- и керосинонасыщенностей, определённых по кривым ККД для воды и керосина, рассчитываем эффективную ($K_{пэ}$) и динамическую ($K_{пд}$) пористости по формулам (2) и (3). В случаях, когда зависимость $K_{кт}=f(p_T)$ не выходит на асимптоту, при расчёте динамической пористости к полученному значению остаточной керосинонасыщенности добавляют объём воды ($\Delta K_{в}$), который находится в образце, как разницу между водонасыщенностью после последнего режима центрифугирования и точкой, где касательная линия отклоняется от ККД.

$$K_{пэ}=K_{п}(1-K_{об}); \quad (2)$$

$$K_{пд}=K_{п}(1-K_{об}-K_{ок}); \quad (3)$$

где $K_{п}$ – открытая пористость в %, $K_{об}$ и $K_{ок}$ – в долях единицы.

Коэффициент извлечения газа (β_T) определяют из соотношения динамической и эффективной пористости (патент 83619) по формуле:

$$\beta_r = K_{пл} / K_{пе}.$$

Для однозначной оценки объёмов остаточной водо- и керосинонасыщенности, формирующих эффективную и динамическую пористости, дополнительно строят дифференциальные кривые вытеснения упомянутых несмешивающихся жидкостей:

$$\Delta K_v / \Delta p_r = f(p_r / p_{max}); \quad (4)$$

$$\Delta K_k / \Delta p_r = f(p_r / p_{max}), \quad (5)$$

де ΔK_v и ΔK_k – прирост соответственно водо- и керосинонасыщенности на каждом режиме центрифугирования,

p_r – текущее значение давления вытеснения, достигаемое на каждом режиме центрифугирования,

p_{max} – максимальное значение давление вытеснения, которого удалось достичь на последнем режиме центрифугирования.

Результаты экспериментальных исследований и их научное обоснование. На первом этапе работы в соответствии с допустимой нагрузкой ротора центрифуги были задействованы восемь образцов различной проницаемости. Характеристики образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов, использованных на первом этапе исследований

Лаб. №	Интервал отбора, м	Литология	Карбонатность, %	Газопроницаемость, мД	Открытая пористость, %	Остаточная водонасыщенность, %*	Плотность кажущаяся мин., г/см ³
45082	4749,7-4757,3	Песчаник к-с/з	0,8	608,5	16,5	12,2	2,65
45064	4749,7-4757,3	Песчаник р-к/з	6,6	240,7	14,9	18,7	2,73
44912	4742,7-4748,7	Песчаник р-к/з	3,7	198,9	13,1	12,8	2,63
44908	4742,7-4748,7	Песчаник р-с/з	7,0	112,3	13,2	18,8	2,73
44914	4742,7-4748,7	Песчаник р-с/з	2,5	58,0	10,8	13,3	2,65
45068	4749,7-4757,3	Песчаник р-с/з	4,5	31,9	10,7	16,6	2,72
45065	4749,7-4757,3	Песчаник р-к/з	20,1	2,7	12,1	29,5	2,84
44906	4742,7-4748,7	Песчаник м/з	5,8	1,8	8,0	22,9	2,76

*На последнем режиме центрифугирования.

Приборная часть работы прошла практически без осложнений, однако при обработке результатов возникли некоторые неопределенности.

Главной из них было получение отрицательных результатов керосинонасыщенности на последних режимах центрифугирования по всем образцам. При этом отрицательные значения остаточной керосинонасыщенности варьировали от -2,3 до -7,95 %. При этом связи с проницаемостью и пористостью образцов не наблюдалось. В ходе центрифугирования из образца отжималось больше керосина, чем могло в него войти при данном значении остаточной воды. При построении зависимости с применением пересчётного коэффициента, ККД для керосина выходила за пределы графика. Наиболее вероятной причиной были изменения остаточной водонасыщенности в ходе эксперимента.

Было высказано предположение о том, что при вторичном центрифугировании отжимается часть остаточной воды вследствие небольшой точности измерения частоты вращения центрифуги и связанной с этим возможностью приложить к образцу несколько большее давления вытеснения. Поскольку в обоих случаях режим соблюдался строго и повысить точность изме-

рения частоты невозможно - проверить это предположение не удалось.

Вторым предположением было то, что образец с остаточной водой теряет её при вакуумировании и при последующем донасыщении потерянная часть воды замещается керосином. Как следствие, объём керосина, поглощённого образцом, становится больше того, что должно быть, если эффективное для керосина пространство определять исходя из начального содержания остаточной воды.

Для проверки этого предположения на втором этапе экспериментальных исследований, в ходе насыщения, после вакуумирования очередного комплекта образцов было произведено их взвешивание перед началом капиллярной пропитки керосином. Характеристика использованных образцов приведена в таблице 2, результаты гравиметрических измерений и потери массы в ходе отдельных операций приведены в таблице 3.

Данные таблицы 3 показывают, что уже при выдержке образца с остаточной водой в бюксах он может потерять от 3 до 10% остаточной воды, а в ходе стандартного вакуумирования образец теряет ориентировочно от 70 до 85% остаточной воды, объём которой при донасыщении замещается керосином. Суммарная

Фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов, использованных на втором этапе исследований

Лаб. №	Интервал отбора, м	Литология	Газопроницаемость, мД	Открытая пористость, %	Остаточная водонасыщенность, %*	Плотность кажущаяся мин., г/см ³
23	4749,7-4757,3	Песчаник	150,8	12,7	13,4	2,65
27	4749,7-4757,3	Песчаник	149,6	13,5	14,5	2,65
26	4749,7-4757,3	Песчаник	77,9	12,1	16,2	2,63
21	4749,7-4757,3	Песчаник	62,2	12,5	13,3	2,70
28	4749,7-4757,3	Песчаник	4,6	10,0	25,0	2,70
29	4749,7-4757,3	Песчаник	3,2	10,4	22,6	2,71

*На последнем режиме центрифугирования.

Таблица 3

Потери массы в ходе отдельных операций при донасыщении образцов с остаточной водой керосином

№ образца	Сухой вес, г	Вес после центрифуги, г	Остаточная вода, г	Масса после 12 часов в бюксах, г	Потеря массы в г (% от ост. воды)	Масса после вакуумирования, г	Потеря массы в г (% от ост. воды)
23	44,22	44,59	0,37	44,57	0,02(5,4)	44,27	0,3(81,1)
27	43,83	44,25	0,42	44,23	0,02(4,8)	43,88	0,35(83,3)
26	44,90	45,32	0,42	45,28	0,04(9,5)	44,96	0,32(76,2)
21	45,53	45,89	0,36	45,88	0,01(2,8)	45,59	0,29(80,6)
28	49,04	49,58	0,54	49,56	0,02(3,7)	49,16	0,4(74,1)
29	48,88	49,38	0,50	49,36	0,02(4,0)	48,98	0,38(76,0)

потеря остаточной воды на переходе между первым и вторым центрифугированием может составлять до 88%. Таким образом, второе предположение о причинах получения отрицательных значений керосинонасыщенности подтверждено экспериментально.

Относительное содержание жидкостей в поровом пространстве образцов можно оценить и расчётным путём. Имея суммарный вес жидкостей, насыщающих образец, объём порового пространства и зная удельные веса минерализованной воды и керосина, можно рассчитать содержания обоих компонентов в поровом пространстве образца. Составляем уравнение:

$$Xв \cdot Vв + Xк \cdot Vк = Pсм$$

где Xв-плотность воды, г/см³

Xк-плотность керосина, г/см³;

Vв-объём воды; см³

Vк-объём керосина, см³;

Pсм- масса смеси, г.

Выразив объём воды через разность объёма смеси и объёма керосина ($Vв=Vсм-Vк$), решаем относительно объёма керосина уравнение, имеющее, например, для образца 44906 вид:

$$1,105(1,54 - Vк) + 0,797 Vк = 1,26.$$

Зная объём керосина и вычитая его из объёма смеси, находим объём воды. Пересчитываем его на вес и находим процентное содержание компонентов по весу, чтобы сравнить с фактическими данными. Для образца 44906 содержание керосина в поровом пространстве

составляет 87,9%, воды - 13,2% от массы смеси или 90,2% и 9,8% объёма пор соответственно. Определённая ранее остаточная вода для этого образца составляет 22,9%. Таким образом, 13,1%, что составит 57,2% от остаточной воды потеряно и замещено керосином. Расчёты могут быть слегка искажены из-за неучёта разностей плотностей остаточной и свободной воды.

Было высказано предположение, что при донасыщении лучше вообще отказаться от вакуумирования и донасыщать образцы только за счёт естественной пропитки сразу после центрифугирования, с последующей стандартной выдержкой в атмосферных условиях.

Для проверки этого предположения была выполнена серия из 4 определений на образцах того же горизонта С-5 Березовского месторождения, аналогичных тем, по которым были выполнены определения предыдущей серии. Характеристика образцов приведена в таблице 4.

В ходе экспериментов донасыщение производилось без вакуумирования, после центрифугирования и последнего взвешивания образцы помещались в поропротитыватель и донасыщались керосином со скоростью капиллярной пропитки. После пропитки образцы продолжали донасыщаться положенное по методике время под уровнем керосина при атмосферном давлении. На подготовленных образцах были проведены определения коэффициента газоотдачи согласно апробируемой методике. Результаты по всем четырём образцам абсолютно

идентичны, поэтому для примера приведены данные только по одному из образцов (лаб. № 25). В таблице 5 приведены данные расчёта,

необходимого для построения основного графика, приведенного на рис. 1.

Таблица 4

Фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов, использованных на втором этапе исследований

Лаб. №	Интервал отбора, м	Литология	Газопроницаемость, мД	Открытая пористость, %	Остаточная водонасыщенность, %*	Плотность кажущаяся мин., г/см ³
19	4749,7-4757,3	Песчаник	143	13,2	15,4	2,64
25	4749,7-4757,3	Песчаник	88,3	12,5	16,7	2,67
20	4749,7-4757,3	Песчаник	45,9	11,4	19,3	2,66
24	4749,7-4757,3	Песчаник	5,3	11,1	25,2	2,70

*На последнем режиме центрифугирования.

Таблица 5

Расчёт приведенных значений текущей керосинонасыщенности для построения графика $K_{кт}=f(p_r)$ согласно апробируемой методике

$K_{в}^T, \%$	$P_{в}^T, \text{КПа}$	$K_{к}^T, \%$	$P_{к}^T, \text{КПа}$	β	β^*	$K_{кт}^*$
100	0	100	0	0	0	16,67
54,92	28,54	60,92	20,42	39,08	32,57	49,24
37,5	114,16	40,23	81,69	59,77	49,81	66,48
28,03	256,86	24,14	183,8	75,86	63,22	79,89
23,11	456,64	14,94	326,76	85,06	70,88	87,55
19,7	713,49	8,05	510,56	91,95	76,63	93,30
16,67	1027,43	3,45	735,21	96,55	80,46	97,13

В таблице: $K_{в}^T$ – коэффициент текущей водонасыщенности,
 $P_{в}^T$ – текущее давление вытеснения воды,
 $K_{к}^T$ – коэффициент текущей керосинонасыщенности,
 $P_{к}^T$ – текущее давление вытеснения керосина,
 β – коэффициент вытеснения керосина,
 β^* – приведенный коэффициент вытеснения керосина,
 $K_{кт}^*$ – приведенный коэффициент текущей керосинонасыщенности.

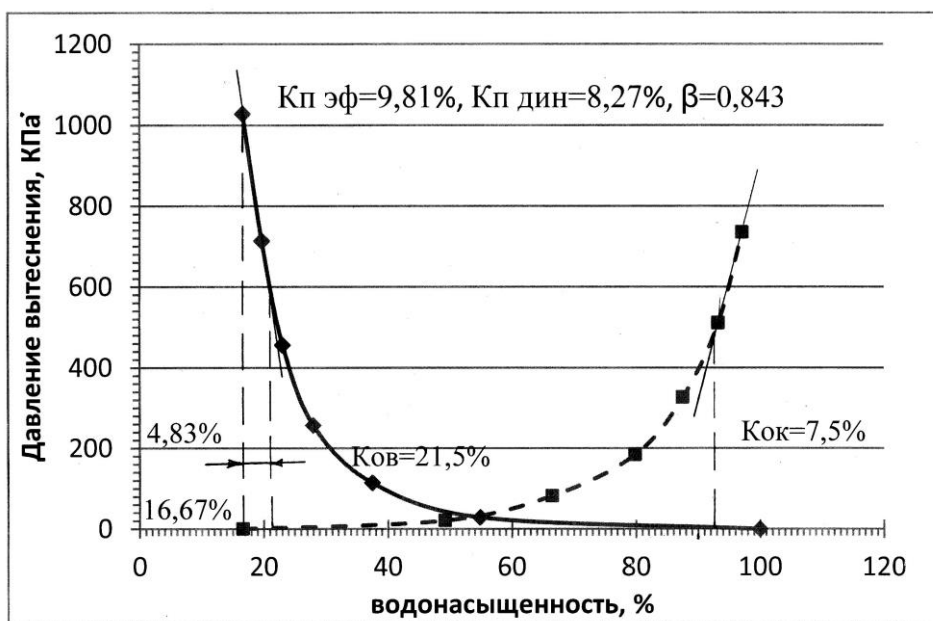


Рис. 1. Типичный график определения $K_{ов}$ и $K_{ок}$ из кривых капиллярного давления – для несмешивающихся жидкостей. Сплошная линия – ККД для воды, пунктирная – ККД для керосина

Согласно методике, графически определённый коэффициент остаточной водонасыщенности составил 21,5 %, остаточной керосинонасыщенности – 7,5 %, рассчитанные по приведенным выше формулам значения эффективной пористости – 9,81 %, динамической – 8,27 %. Расчётное значение коэффициента газотдачи: $\beta_r=0,843$.

При видимом благополучии обратило на себя внимание несоответствие объёмов освобождённого от воды при центрифугировании порового пространства и поглощённого при донасыщении керосина. Если общий объём порового пространства составляет $2,389 \text{ см}^3$, а объём остаточной воды $0,3922 \text{ см}^3$, то свободное пространство, которое должен заполнить керосин, равно: $2,389 \text{ см}^3 - 0,3922 \text{ см}^3 = 1,992 \text{ см}^3$. Вошло же в него всего $1,100 \text{ см}^3$ керосина. По-

сле проверки по остальным образцам, где было отмечено то же явление. Было выдвинуто предположение о резком недонасыщении образца керосином.

Однако построить график и получить результат это не помешало, в отличие от первой серии опытов. Возникает вопрос, почему мы получили результат и насколько он достоверен. Поскольку при составлении таблицы исходных данных для основного графика коэффициент β пересчитывался с помощью пересчётного коэффициента на объём полного порового пространства, попробовали пересчитать его напрямую, соотнося объёмы вытесненного керосина с объёмом порового пространства, задавшись объёмом последнего равным $2,389 \text{ см}^3$. Результаты расчёта приведены в табл. 6. График, построенный по этим данным, приведен на рис. 2.

Таблица 6

Расчёт приведенных значений текущей керосинонасыщенности для построения графика $K_{кт}=f(p_r)$ с учётом неполноты донасыщения

$K_{в}^T, \%$	$P_{в}^T, \text{КПа}$	$K_{к}^T, \%$	$P_{к}^T, \text{КПа}$	β	β^*	$K_{кт}^*$
100	0	100	0	0	0	16,67
54,92	28,54	60,92	20,42	39,08	17,99	34,66
37,5	114,16	40,23	81,69	59,77	9,53	44,19
28,03	256,86	24,14	183,8	75,86	7,41	51,60
23,11	456,64	14,94	326,76	85,06	4,23	55,83
19,7	713,49	8,05	510,56	91,95	3,17	59,00
16,67	1027,43	3,45	735,21	96,55	2,12	61,12

Сокращения те же, что в таблице 5.

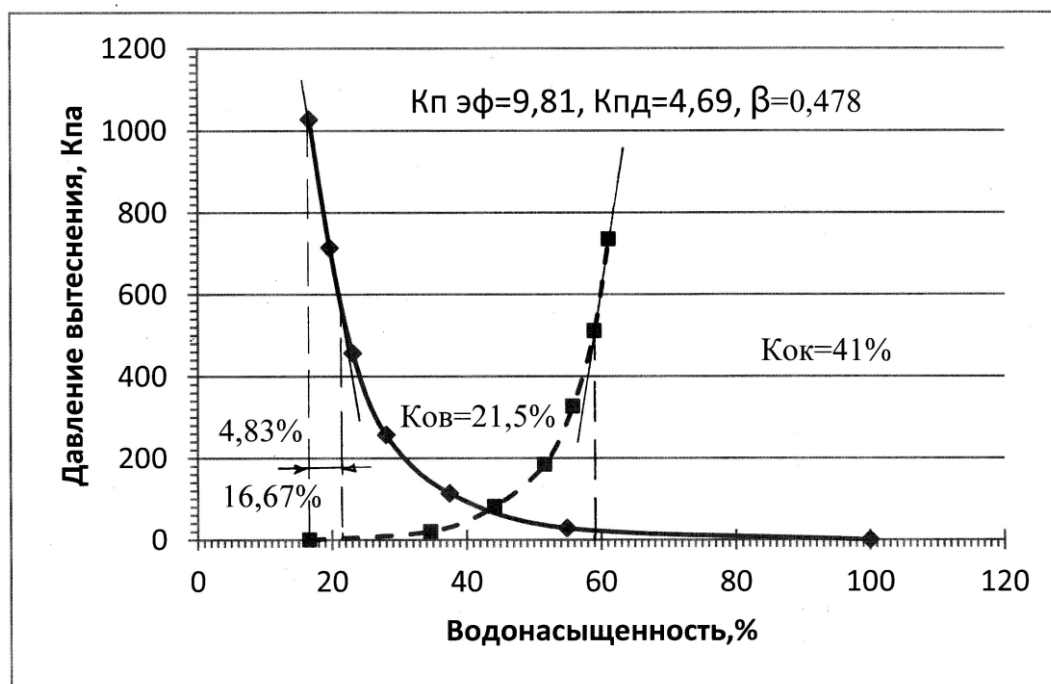


Рис. 2. Типичный график при расчёте $K_{ок}$ на реальный объём поглощённого керосина. Сплошная линия – ККД для воды, пунктирная – ККД для керосина.

Как видим, график хорошо отражает не-полноту донасыщения образца керосином. Естественно, полученные по этому графику значения $K_{ок}$, $K_{п. дин}$ и β будут отличаться от тех, которые получены по графику (см. рис 1). Возникает вопрос, почему неполнота насыщения не вскрылась в ходе построения первого графика. Пересчёт β на β^* осуществлялся с помощью деления на величину пересчётного коэффициента $K=1/1-K_{ов}$. Нетрудно убедиться даже на числовых примерах, что это действие эквивалентно умножению β на $1-K_{ов}$. При этом β , (т.е. коэффициент вытеснения керосина) выражен в процентах от объёма эффективного (керосинонасыщенного) пространства. Умножив его на $1-K_{ов}$, мы получаем ту часть полного порового пространства, из которой вытеснен керосин. Сложив с частью общего порового пространства, заполненной остаточной водой, мы получаем 100%. Имеется полная аналогия с формулой расчёта эффективной пористости по значениям открытой пористости и остаточной воды: $K_{п. эф} = K_{п.} \cdot (1-K_{ов})$.

Формула «работает» вполне правильно, но с одним условием: эффективное поровое пространство должно быть полностью донасыщено керосином. Если же оно недонасыщено, формула «растягивает» по эффективному поровому пространству любое содержание керосина и маскирует недонасыщение, так как в неё заложен, как 100% любой вошедший объём керосина.

Выявив источник возможных погрешностей, можно предложить и способ их минимизации. Для этого рекомендуется внести в методику донасыщения образцов керосином некоторые изменения относительно методики принятой в ГОСТ 26450.1-85 [4]. Целью этих изменений является сведение к минимуму потерь остаточной водонасыщенности на испарение при вакуумировании. Для этого образцы с остаточной водонасыщенностью донасыщаются заранее отвакуумированным отдельно от образцов керосином, и вакуум на образцы с остаточной водой подаётся только кратковременно, на время капиллярной пропитки, для её стимуляции. Выдержка под атмосферным давлением соответствует рекомендациям упомянутого документа.

В связи с тем, что компьютерные программы для обработки подобных экспериментов отсутствуют, а их разработка в случае единичной серии опытов не представляется целесообразной, обработка результатов проводилась вручную. Точнее, с помощью стандартной про-

граммы «Excel» строились графики с нанесенными фактическими точками, а соответствующие кривые и их обработка проводились вручную. Была сделана попытка аппроксимации опытных точек стандартным набором простых функций «Excel», однако если в случае ККД для воды часто удавалось добиться неплохого результата, то в случае ККД для керосина результат чаще всего был неудовлетворительным. В дальнейшем, в случае компьютерной аппроксимации фактических точек с получением формулы кривой появляется возможность аналитического расчёта значений коэффициентов остаточной воды и остаточного керосина без трудоёмких и не особенно точных графических построений.

При построении графиков ККД особенных проблем не возникает, если не считать некоторого субъективизма при проведении прямых к конечному участку ККД. Согласно ГСТУ 41-00032626-00-025-2000 [1] эта прямая определялась как «касательная», проведенная к конечному участку ККД. Однако, по определению, касательная проводится к какой-то точке кривой, которая при геометрически правильном построении и будет точкой отрыва. Физический смысл этой прямой в попытке зафиксировать начало стабилизации наклона ККД к оси абсцисс. К сожалению, её приходится проводить практически «на глаз» к конечному участку кривой, что, как и определение точки отрыва от ККД, неизбежно связано с некоторым субъективизмом исполнителя. Точка отрыва зависит даже от толщин линий. Однако лучшего метода пока не предложено и остаётся руководствоваться этим.

Дифференциальные кривые вытеснения воды и керосина рассчитываются и отстраиваются с помощью стандартной программы «Excel» легко и быстро, однако значение их в данном случае скорее вспомогательное.

Заключение. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на коллекции пород-коллекторов с различными фильтрационно-емкостными свойствами позволили выявить возможные источники погрешностей определения остаточного флюидонасыщения, связанные в основном с процессом донасыщения образцов керосином и предложить поправки к базовой методике, позволяющие их минимизировать. После принятия этих поправок методику определения коэффициента извлечения газа по керну можно считать апробированной в условиях производственной лаборатории и рекомендовать к стандартизации на уровне СОУ.

Література

1. ГСТУ 41-00032626-00-025-2000. Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Методика виконання вимірювань методом центрифугування зразків [Текст]. – Введ. 2000-12-27. – К. : Мінекоресурсів України, 2001. – 19 с.
2. Процес визначення газовіддавальних властивостей порід-колекторів. Патент 83619 України на корисну модель МПК G01N15/08 [Текст] / Кривуля С. В., Владика В. М., Нестеренко М. Ю., Балацький Р. С. – № 83619; заявл. 05.02.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.
3. ГОСТ 26450.0-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств [Текст]. – Введ. 1985-02-27. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 12 с.
4. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостена-сьщением [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
5. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 16 с.
6. Нестеренко, М. Ю. Петрографічні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів [Текст] / М. Ю. Нестеренко. – К. : УкрДГРІ, 2010. – 224 с.

УДК 550.4:543.422

О.В. Полевич, к.т.н., пров.н.с.,
О.В. Шперер, пров. інженер,
О.В. Чуєнко, зав.лаб.,

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

ФОРМУВАННЯ ГІДРОГЕОХІМІЧНИХ БАР'ЄРІВ У ЗОНАХ КОНТАКТУ ПІДЗЕМНИХ ТЕХНОГЕННИХ ПОТОКІВ З ПОВЕРХНЕВИМИ ПРИРОДНИМИ ВОДАМИ

В роботі розглянуто процеси накопичення важких металів в зоні постійного контакту. Вивчено розподіл концентрацій металів у воді і донному ґрунті досліджуваного району акваторії. Проведено дослідження проб води (придонного шару) та проб донних відкладень, відібраних у зоні змішування. Показано, що в зоні змішування при приховуваному підземному розвантаженні ґрунтового стоку донними відкладеннями виконується функція фільтру для важких металів, утворюється гідрогеохімічний бар'єр. Визначені параметри бар'єру (потужність, градієнт та контрастність) для кожного з досліджуваних елементів у придонному шарі води та у донному ґрунті.

Ключові слова: підземні техногенні потоки, поверхневі природні води, донні відкладення, зони постійного контакту, гідрогеохімічні бар'єри, важкі метали, нормування антропогенного забруднення.

О.В. Полевич, А.В. Шперер, А.В. Чуєнко. ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ В ЗОНАХ КОНТАКТА ПОДЗЕМНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПРИРОДНЫМИ ВОДАМИ. В работе рассмотрены процессы накопления тяжелых металлов в зоне постоянного контакта. Изучено распределение концентраций металлов в воде и донном грунте исследуемого района акватории. Проведено исследование проб воды (придонного слоя) и проб донных отложений, отобранных в зоне смешения. Показано, что в зоне смешения при скрытой подземной разгрузке ґрунтового стока донными отложениями выполняется функция фильтра для тяжелых металлов, образуется гео-гидрохимический барьер. Определены параметры барьера (мощность, градиент и контрастность) для каждого из исследуемых элементов в придонном слое воды и в донном грунте.

Ключевые слова: подземные техногенные потоки, поверхностные природные воды, донные отложения, зоны постоянного контакта, гидрогидрохимические барьеры, тяжелые металлы, нормирование антропогенного загрязнения.

Актуальність дослідження. Зростаючий антропогенний вплив на біосферу взагалі та на окремі екосистеми, запровадження у біогеохімічні міграційні цикли та трофічні ланцюги елементів у кількостях та співвідношеннях, не властивих сформованому «геохімічному гомеостазу» екосистем, виявляється у зміні еколого-геохімічних факторів середовища [1]. Розширення кола застосованих ксенобіотиків призвело до необхідності пошуку підходів, які дозволяють оцінювати потенційний ризик їх надходження до кінцевих водоймищ стоку та накопичення у водній товщі та у донних відкладеннях до небезпечних для функціонування водної екосистеми рівнів.

На сучасному етапі на стан поверхневих водних об'єктів у межах України впливає велика кількість природних і антропогенних факторів, що обумовлюють екологічні ризики форму-

вання його якісних показників у головних сферах водокористування.

Дослідження багатьох авторів свідчать про стійкі незворотні зміни у якісному та кількісному складі поверхневих природних вод України залежно від різних природно-кліматичних зон та набуття ними нової стадії рівноваги – техногенної. Ці зміни відбуваються незважаючи на поступове зменшення об'ємів скиду забруднених та недостатньо очищених зворотних вод у поверхневі водні об'єкти.

Аналіз статистичних даних спостереження за окремими поверхневими внутрішніми акваторіями України показує стійке незворотне підвищення показників загальної мінералізації як найбільш чутливої характеристики техногенного впливу на водно-поверхневу систему.

Ці факти говорять про необхідність врахування у питаннях управління водокористуван-