

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИВЧЕННЯ ГАЗОПРОНИКНОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД В УМОВАХ ПРОСЛИЗАННЯ МОЛЕКУЛ ГАЗУ

¹Я.А. Пилип, ¹В.М. Владика, ¹М.Ю. Нестеренко, ¹Р.С. Балацький, ²Т.В. Здерка

¹ Львівський комплексний науково-дослідний центр УкрНДІгазу, 79026, м. Львів, вул. Стрийська 144, тел. (0322) 632179, e-mail: lkn d c 1 @ r a m b l e r . r u

² ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727121, e-mail: z d e r k a @ u k r . n e t

Узагальнено результати досліджень з вивчення фільтраційних властивостей порід-колекторів і порід-покришок, висвітлено проблемні питання, які при цьому виникають. Описано методику визначення поправки за ефект прослизання газу (ефект Клінкенберга).

Для практичного використання запропоновано номограми з визначення абсолютної газо- і рідинопроводимості порід-колекторів і порід-покришок з поправкою на прослизання молекул газу (ефект Клінкенберга) за одиничними вимірами поточної газопроникивності за будь-якого середнього тиску.

Піднімається питання про умови і межу переходу режимів від клінкенбергівського (з просковзуванням молекул газу) до кнудсенівського (молекулярного). Розраховано співвідношення абсолютної (K_{pr}^p) та поточної (нозірної) (K_{pr}) величин газопроникивності для умов значного, але не надто глибокого вакууму. За результатами розрахунків побудовано графік ймовірних поправок для порід-колекторів з абсолютною газопроникивністю в межах $(0,01-1000) \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$.

Ключові слова: порода, газопроникивність, рідинопроводимість, ефект Клінкенберга.

Обобщены результаты исследований по изучению фильтрационных свойств пород-коллекторов и пород-покрышек, рассмотрены проблемные вопросы, которые при этом возникают. Описана методика определения поправки за эффект проскальзывания газа (эффект Клинкенберга).

Для практического использования предложены номограммы по определению абсолютной газо- и жидкостепроницаемости пород-коллекторов и пород-покрышек с поправкой на проскальзывание молекул газа (эффект Клинкенберга) по единичным измерениям текущей газопроницаемости при любом среднем давлении.

Затрагивается вопрос об условиях и границе перехода режимов от клинкенберговского (с проскальзыванием молекул газа) к кнудсеновскому (молекулярному). Рассчитано соотношение абсолютной (K_{pr}^p) и текущей (кажущейся) (K_{pr}) величин газопроницаемости для условий значительного, но не слишком глубокого вакуума. По результатам расчетов построен график предполагаемых поправок для пород-коллекторов с абсолютной газопроницаемостью в пределах $(0,01-1000) \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$.

Ключевые слова: порода, газопроницаемость, жидкостепроницаемость, эффект Клинкенберга.

In the article the research results in the study of the reservoir rocks and caprocks filtration properties have been summarized and highlighted other problems arising meanwhile. The method for determining the correction for gas slippage effect (Klinkenberg's effect) was described.

The nomograms for determining absolute gas and fluid permeability of reservoir rocks and caprocks with the correction on the gas molecules slippage (Klinkenberg's) were offered for single measurements of current gas permeability at any medium pressure.

The issue about conditions and boundary of the modes transition from Klinkenberg's effect (with the gas molecules slippage) to Knudsenivsk's one (molecular). The relation of absolute gas permeability (K_{pr}^p) and current (apparent) value of permeability (K_{pr}) for conditions of significant but not very deep vacuum was calculated. Due to the results of calculations the graph was plotted using apparent corrections for reservoir rocks with absolute gas permeability within the range of $(0,01 - 1000) \text{ mkm}^2 \cdot 10^{-3}$.

Key words: rock, gas permeability, fluid permeability, Klinkenberg's effect.

Вступ

Проникивність – це фільтраційний параметр гірської породи, який характеризує її кількісну здатність пропускати через себе рідини і гази за наявності перепаду тисків. Абсолютно непроникивних порід у природі немає. При відносно невеликих перепадах тисків у пластах, багато порід з малими розмірами пор виявляються слабо або практично непроникивними для рідин і газів (глини, галіти тощо) і слугують покришками над покладами нафти і газу. Однак більшості осадових порід, зокрема породам-колекторам підземних флюїдів, притаманна суттєва

проникивність, оскільки, крім субкапілярних пор і тріщин, у них часто присутні також пори більших розмірів. У нафтогазопромисловій галузі за проникивністю порід-колекторів визначаються обсяги припливів до вибоїв свердловин нафти, газу і води, отже вона є одним з найважливіших параметрів при проектуванні і здійсненні технологічного процесу розробки родовищ вуглеводнів.

Аналіз попередніх досліджень

Для характеристики фільтраційних властивостей гірських порід використовують так зва-

ну абсолютну проникність, під якою розуміють її величину, що визначена під час руху через породу однофазного флюїду (газу чи рідини), фізико-хімічно інертного до неї. Тобто це характеристика порового простору, що не залежить від властивостей флюїдів, якщо відсутня їхня взаємодія з породами. Фактично рідини переважно взаємодіють з породами (утворюють адсорбційні шари, смолисто-асфальтенові компоненти кольматують пори, глинисті частинки набухають тощо), тому рідинопроводність, як свідчать експерименти, зазвичай буває меншою за абсолютну газопроникність [1,2,3]. З цієї причини для визначення абсолютної проникності гірських порід в лабораторній практиці використовують гази – азот, або повітря, рідше гелій. Величини абсолютної газопроникності, що виміряні за нормативно окресленими правилами [2,4,5], є характеристичними і взаємно співставимими показниками для усіх літотипів порід.

З часу дослідів Клінкенберга [6] відомо, що за рахунок прослизання молекул газу зі зменшенням середнього тиску зростає газопроникність гірських порід і, загалом, пористо-капілярних середовищ. У них середня довжина пробігу молекул газу порівнянна з перетином фільтраційних каналів (мікрокапілярів, мікротріщин, пор тощо), тому класичний, як у рідин, еліпсоподібний профіль швидкостей порушується і газ рухається швидше, ніж це впливає із законів Пуазейля і Дарсі. Поточні (позірні) величини газопроникності K_{np} на різних середніх тисках з абсолютною газопроникністю K_{np}^p пов'язані рівнянням:

$$K_{np} = K_{np}^p (1 + b / \bar{p}), \quad (1)$$

у якому K_{np}^p – абсолютна газопроникність, яка за величиною дорівнює рідино проникності, якщо відсутня взаємодія рідини з породою; b – коефіцієнт характерний для даної системи газ-порода (поправка Клінкенберга); \bar{p} – середній тиск газу у зразку.

Формування цілей статті та висвітлення основного матеріалу

З рівняння (1) видно, що поточна газопроникність K_{np} обернено пропорційна до середнього тиску і ця залежність лінійна. На графіку в координатах $K_{np}-f(1/\bar{p})$ точки поточних значень K_{np} апроксимуються прямою лінією, яка на перетині з ординатою відсікає величину абсолютної газопроникності K_{np}^p , а кут α нахилу вказує міру відхилення від неї (поправку Клінкенберга). Остання у рівнянні (1) виражена коефіцієнтом b , що скалярно дорівнює співвідношенню $\text{tg } \alpha / K_{np}^p$.

Для визначення абсолютної газопроникності K_{np}^p з урахуванням поправки на ефект прослизання молекул газу (ефект Клінкенберга), необхідно здійснювати проміжні вимірювання

позірних величин газопроникності K_{np} на різних (3–5 і більше точок) середніх тисках, що потребує значного часу. З метою прискорення лабораторних досліджень проводилися пошуки способів уведення названої поправки до одиничних вимірювань K_{np} , використовуючи кореляційну залежність поправочного коефіцієнта b від абсолютної газопроникності K_{np}^p [4,5,7].

Підставою для таких пошуків є наявність досить тісного зв'язку між структурою порового простору, зокрема між усередненим чи медіанним розміром порових каналів, та фільтраційними властивостями порід і відповідно ступенем відхилення від лінійного закону Дарсі. На основі численних експериментів різні дослідники [2, 8,] одержували кореляції, що дещо відрізнялися за числовими коефіцієнтами і показниками степеня. Найбільш універсальним рекомендованим АНІ вважається наступне рівняння регресії:

$$b = 0,777(K_{np}^p)^{-0,39}. \quad (2)$$

Слід зауважити, що рівняння (2) ґрунтується на дослідях із застосуванням азоту і справедливе саме для цього газу та повітря, яке майже повністю складається з азоту і має практично близькі до нього фізичні властивості. Ці гази повсюдно використовуються в петрофізичних лабораторіях для масових вимірювань газопроникності. Для інших газів (метан, вуглекислий газ, гелій тощо), які можуть застосовуватись у спеціальних експериментах, поправки на ефект Клінкенберга будуть відрізнятися пропорційно до середньої довжини λ вільного пробігу молекул газу. Значення коефіцієнта b для інших газів можуть бути знайдені за співвідношенням:

$$\frac{b \text{ азоту}}{b \text{ іншого газу}} = \frac{\lambda \text{ азоту}}{\lambda \text{ іншого газу}}. \quad (3)$$

Опираючись на результати експериментів та на кореляцію за рівнянням (2), пропонувалися графічні способи уведення поправок на прослизання молекул азоту (на ефект Клінкенберга) для визначення абсолютної газопроникності K_{np}^p за одиничними вимірюваннями параметра K_{np} на будь-якому середньому тиску. Для цього виконувалися розрахунки названих поправок для різних арифметичних порядків проникності і окремих середніх тисків. За таким принципом можна здійснювати експерименти, задаючись будь-якими співвідношеннями тисків на вході в зразок та виході з нього, зберігаючи незмінними середні тиски. При цьому величини коефіцієнтів b згідно з рівнянням (2) і співвідношення K_{np}^p / K_{np} не змінюватимуться від перепадів тисків, якщо останні збільшуючись не призводять до зміни режиму фільтрації з ламінарного на турбулентний. З огляду на це у літературних джерелах [1, 7, 9, 10 та ін.] і нормативних документах [2, 4, 5] рекомендується під час дослідів вибирати перепади тисків якнайменшими. За результатами розрахунків було побудовано серію графіків для окремих порядків (роз-

рядів) величин $K_{пр}^p$ порід-покришок з проникністю в межах $(0,01 - 10^{-8}) \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$. Подібні графіки за експериментальними даними запропоновані в стандарті Держгеолслужби України [5] для порід-колекторів. Основний недолік таких графіків – їхня велика кількість і певна незручність в інтерполяції між двома не зовсім паралельними лініями у кожному із розрядів проникності.

Отримані результати досліджень та їх наукове обґрунтування

Автори статті пропонують для практичного застосування найбільш зручне графічне уведення поправок за допомогою універсальних номограм. Для їхньої побудови використана залежність між поточною (позірною) газопроникністю $K_{пр}$ (у даному випадку азотопроникність) і співвідношенням абсолютної та поточної $K_{пр}$ газопроникностей на різних середніх тисках $K_{пр} = f(K_{пр}^p / K_{пр})$.

На основі розрахунків (табл. 1) за рівняннями (1) і (2) нами побудовані дві повномасштабні номограми – одна на рисунку 1 для порід колекторів з проникністю $(0,01-1000) \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ і друга (рис. 2) стосовно низькопроникних, в межах $10^{-2}-10^{-10} \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$, порід-покришок. Для останніх це особливо важливо, позаяк величина поправки за ефект Клінкенберга, залежно від варіації проникності та середніх тисків, може навіть на 2 – 4 порядки перевищувати фактичне значення абсолютної газопроникності породи. Середні тиски переведені в МПа, величини проникності в $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$, тобто в сучасну міжнародну систему одиниць. Номограми представлені з подекадними координатними сітками, що робить їх зручними у користуванні, отже цілком придатними для практичного використання у петрофізичних лабораторіях. Слід зауважити, що у літературних джерелах раніше зустрічалися подібні побудови у вигляді малорозмірних ілюстрацій в межах невеликих середніх тисків (до 0,3 МПа) [4, 7]. Це були здебільшого схеми, а не повноцінні графічні побудови для практичного використання.

Запропоновані нами номограми застосовуються наступним чином. Під час експериментальних досліджень достатньо ретельно виконати поодинокі вимірювання позірної газопроникності $K_{пр}$ зразка породи лише на одному вибраному для цього середньому тиску. Його встановлюють за доцільним співвідношенням перепаду тисків Δp і витрат газу Q_o . Для уникнення переходу від ламінарного до турбулентного режиму фільтрації газу перепад тиску бажано встановлювати якнайменшим, який би однак згідно з [2] забезпечував достатньо точне вимірювання витрат газу газомірними приладами $\Delta Q_o / Q_o \leq 0,4\%$. При цьому тривалість процесу вимірювання повинна бути в межах 50–500 с [4, 5]. За наявним значенням $K_{пр}$ на даному \bar{p} з номограми знаходять величину

поправочного співвідношення $K_{пр}^p / K_{пр}$ і множенням цього коефіцієнта на $K_{пр}$ обчислюють $K_{пр}^p$. Наприклад, за вимірним $K_{пр} = 18 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ за середнього тиску 0,14 МПа величина $K_{пр}^p / K_{пр} = 0,83$, отже $K_{пр}^p = 18 \cdot 0,83 = 14,9 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ (див. рис. 1).

Варто зазначити, що рівняння регресії (1), як кожна універсальна кореляція, зазвичай грішить певною неточністю, про що може свідчити значне відхилення точок. Це пов'язано із структурою порового простору порід, насамперед з кількістю і діаметрами пор і розкриттям мікротріщин максимальних розмірів. Було би доцільним у майбутньому здійснити пошук корелятивів газопроникності з результатами капіляриметрії, якщо такі комплексні дослідження виконувалися би послідовно на одноіменних зразках порід. Загалом із застосуванням запропонованої номограми здебільшого будуть отримані задовільні результати визначення $K_{пр}^p$, точність яких не виходитиме за межі похибок допустимих інструктивними документами [2, 4, 5]. Якщо інколи для окремих спеціальних експериментів потрібна особлива точність визначення абсолютної газопроникності $K_{пр}^p$, тоді досліди слід виконувати на кількох (не менше 3-5) різних середніх тисках з якомога меншими перепадами тисків і будувати графік $K_{пр} - f(1/\bar{p})$.

Перспективи подальших досліджень

У деяких публікаціях [10,12] згадується ще, як окремий, кнудсенівський молекулярний режим руху газу за глибокого вакууму. Не в'ясненим, однак, залишається питання про умови і межу переходу режимів від клінкенбергівського (з просковзуванням молекул газу) до кнудсенівського (молекулярного), якщо така межа взагалі реально існує. Тобто другий з цих режимів вірогідно є продовженням першого з поправкою на ефект Клінкенберга, яка за розрахунком буде великою в умовах глибокого вакууму. Такий вакуум, що досягає величини, меншої за 1 мм рт. ст. використовується, зокрема, у дослідях з ґрунтознавства при визначенні питомої поверхні пористих середовищ [11], але для практичного вимірювання газопроникності гірських порід не потрібний. Зрештою різні автори нерідко називають кнудсенівським саме рух газу за Клінкенбергом [7, 10]. Більш того, в роботах [6, 7] подані таблиця дослідів Клінкенберга і відповідний їй графік, які однозначно показують, що чітка прямолінійна залежність $K_{пр} = f(1/\bar{p})$ зберігається в межах середніх тисків від 20 атм (2 МПа) аж до 0,01 атм (0,001 МПа). Отже, якщо існував би окремий закон фільтрації газу (молекулярний кнудсенівський), то йому належало би місце хіба за середніх тисків (вакууму), значно менших аніж тисячна частка МПа.

Таблиця 1 – Співвідношення K_{np}^p/K_{np} для гірських порід відносно середніх тисків

K_{np}^p , мкм ² ·10 ⁻³ (мД)	$b = 0,777x$ $(K_{np}^p)^{-0,39}$, безрозм.	\bar{p} , МПа	$1/\bar{p}$, МПа ⁻¹	$K_{np} = K_{np}^p \left(1 + \frac{0,1b}{\bar{p}}\right)$, мкм ² ·10 ⁻³	$\frac{K_{np}^p}{K_{np}}$, безрозм.
1	2	3	4	5	6
Породи-колектори					
1000	0,05253	0,1	10	1052,5	0,950
		0,15	6,6667	1035,0	0,966
		0,2	5	1026,3	0,974
		0,3	3,333(3)	1017,5	0,983
		0,4	2,5	1013,1	0,987
		0,5	2	1010,5	0,990
		0,6	1,6667	1008,8	0,991
		1	1	1005,3	0,995
		2	0,5	1002,6	0,997
		5	0,2	1001,1	0,999
10	0,1	1000,5	1,0		
100	0,1290	0,1	10	112,9	0,886
		0,15	6,6667	108,6	0,921
		0,2	5	106,4	0,940
		0,3	3,333(3)	104,3	0,959
		0,4	2,5	103,2	0,969
		0,5	2	102,6	0,975
		0,6	1,6667	102,2	0,978
		1	1	101,3	0,987
		2	0,5	100,6	0,994
		5	0,2	100,3	0,997
10	0,1	100,1	0,999		
10	0,3165	0,1	10	13,17	0,759
		0,15	6,6667	12,11	0,826
		0,2	5	11,58	0,864
		0,3	3,333(3)	11,06	0,904
		0,4	2,5	10,79	0,927
		0,5	2	10,63	0,940
		0,6	1,6667	10,53	0,950
		1	1	10,32	0,969
		2	0,5	10,16	0,984
		5	0,2	10,06	0,994
10	0,1	10,03	0,997		
1	0,7770	0,1	10	1,777	0,563
		0,15	6,6667	1,518	0,659
		0,2	5	1,388	0,720
		0,3	3,3333	1,259	0,794
		0,4	2,5	1,194	0,838
		0,5	2	1,155	0,866
		0,6	1,6667	1,130	0,885
		1	1	1,078	0,928
		2	0,5	1,039	0,962
		5	0,2	1,016	0,984
10	0,1	1,008	0,992		
0,1	1,9073	0,1	10	0,2907	0,344
		0,15	6,6667	0,2272	0,440
		0,2	5	0,1954	0,512
		0,3	3,3333	0,1636	0,611
		0,4	2,5	0,1477	0,677
		0,5	2	0,138	0,724
		0,6	1,6667	0,1318	0,759
		1	1	0,1191	0,840
2	0,5	0,1095	0,913		

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
0,1	1,9073	5	0,2	0,1038	0,963
		10	0,1	0,1019	0,981
0,01=(10 ⁻²)	4,6819	0,1	10	5,682·10 ⁻²	0,176
		0,15	6,6667	4,121·10 ⁻²	0,242
		0,2	5	3,340·10 ⁻²	0,299
		0,3	3,3333	2,561·10 ⁻²	0,390
		0,4	2,5	2,171·10 ⁻²	0,461
		0,5	2	1,936·10 ⁻²	0,516
		0,6	1,6667	1,780·10 ⁻²	0,562
		1	1	1,468·10 ⁻²	0,681
		2	0,5	1,234·10 ⁻²	0,810
		5	0,2	1,094·10 ⁻²	0,914
10	0,1	1,047·10 ⁻²	0,955		
Породи-покришки					
0,001=(10 ⁻³)	11,493	0,1	10	0,1249·10 ⁻²	0,0801
		0,15	6,6667	8,662·10 ⁻³	0,115
		0,2	5	6,746·10 ⁻³	0,148
		0,3	3,3333	4,830·10 ⁻³	0,207
		0,5	2	3,299·10 ⁻³	0,303
		0,6	1,6667	2,920·10 ⁻³	0,343
		1	1	2,149·10 ⁻³	0,465
		2	0,5	1,575·10 ⁻³	0,635
		5	0,2	1,230·10 ⁻³	0,813
		10	0,1	1,115·10 ⁻³	0,897
0,0001=(10 ⁻⁴)	28,211	20	0,05	1,057·10 ⁻³	0,946
		0,1	10	2,921·10 ⁻³	3,42·10 ⁻²
		0,2	5	1,511·10 ⁻³	6,62·10 ⁻²
		0,5	2	6,642·10 ⁻⁴	0,151
		1	1	3,821·10 ⁻⁴	0,262
		2	0,5	2,411·10 ⁻⁴	0,415
		5	0,2	1,564·10 ⁻⁴	0,639
		10	0,1	1,282·10 ⁻⁴	0,780
10 ⁻⁵	69,250	20	0,05	1,141·10 ⁻⁴	0,876
		0,1	10	7,025·10 ⁻⁴	1,42·10 ⁻²
		0,2	5	3,562·10 ⁻⁴	2,81·10 ⁻²
		0,5	2	1,485·10 ⁻⁴	6,73·10 ⁻²
		1	1	7,925·10 ⁻⁵	0,126
		2	0,5	4,462·10 ⁻⁵	0,224
		5	0,2	2,385·10 ⁻⁵	0,419
10 ⁻⁶	169,99	10	0,1	1,693·10 ⁻⁵	0,591
		0,1	10	1,710·10 ⁻⁴	5,85·10 ⁻³
		0,2	5	8600·10 ⁻⁵	1,16·10 ⁻²
		0,5	2	3,500·10 ⁻⁵	2,86·10 ⁻²
		1	1	1,800·10 ⁻⁵	5,56·10 ⁻²
		2	0,5	9,500·10 ⁻⁶	0,105
		5	0,2	4,400·10 ⁻⁶	0,227
		10	0,1	2,700·10 ⁻⁶	0,370
10 ⁻⁷	417,27	20	0,05	1,850·10 ⁻⁶	0,541
		0,1	10	4,183·10 ⁻⁵	2,39·10 ⁻³
		0,2	5	2,096·10 ⁻⁵	4,77·10 ⁻³
		0,5	2	8,445·10 ⁻⁶	1,18·10 ⁻²
		1	1	4,273·10 ⁻⁶	2,34·10 ⁻²
		2	0,5	2,186·10 ⁻⁶	4,57·10 ⁻²
		5	0,2	9,345·10 ⁻⁷	0,107
		10	0,1	5,173·10 ⁻⁷	0,193
20	0,05	3,086·10 ⁻⁷	0,324		

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6
10^{-8}	1024,3	0,1	10	$1,025 \cdot 10^{-5}$	$9,76 \cdot 10^{-4}$
		0,2	5	$5,132 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$
		0,5	2	$2,059 \cdot 10^{-6}$	$4,86 \cdot 10^{-3}$
		1	1	$1,034 \cdot 10^{-6}$	$9,67 \cdot 10^{-3}$
		2	0,5	$5,222 \cdot 10^{-7}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$
		5	0,2	$2,149 \cdot 10^{-7}$	$4,65 \cdot 10^{-2}$
		10	0,1	$1,124 \cdot 10^{-7}$	$8,89 \cdot 10^{-2}$
		20	0,05	$6,122 \cdot 10^{-8}$	0,163
10^{-9}	2514,3	0,1	10	$2,515 \cdot 10^{-6}$	$3,98 \cdot 10^{-4}$
		0,2	5	$1,258 \cdot 10^{-6}$	$7,95 \cdot 10^{-4}$
		0,5	2	$5,039 \cdot 10^{-7}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$
		1	1	$2,524 \cdot 10^{-7}$	$3,96 \cdot 10^{-3}$
		2	0,5	$1,267 \cdot 10^{-7}$	$7,89 \cdot 10^{-3}$
		5	0,2	$5,129 \cdot 10^{-8}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$
		10	0,1	$2,614 \cdot 10^{-8}$	$3,83 \cdot 10^{-2}$
		20	0,05	$1,357 \cdot 10^{-8}$	$7,37 \cdot 10^{-2}$
10^{-10}	6171,9	0,1	10	$6,172 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$
		0,2	5	$3,087 \cdot 10^{-7}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$
		0,5	2	$1,235 \cdot 10^{-7}$	$8,10 \cdot 10^{-4}$
		1	1	$6,182 \cdot 10^{-8}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
		2	0,5	$3,096 \cdot 10^{-8}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$
		5	0,2	$1,244 \cdot 10^{-8}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$
		10	0,1	$6,272 \cdot 10^{-9}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
		20	0,05	$3,186 \cdot 10^{-9}$	$3,14 \cdot 10^{-2}$

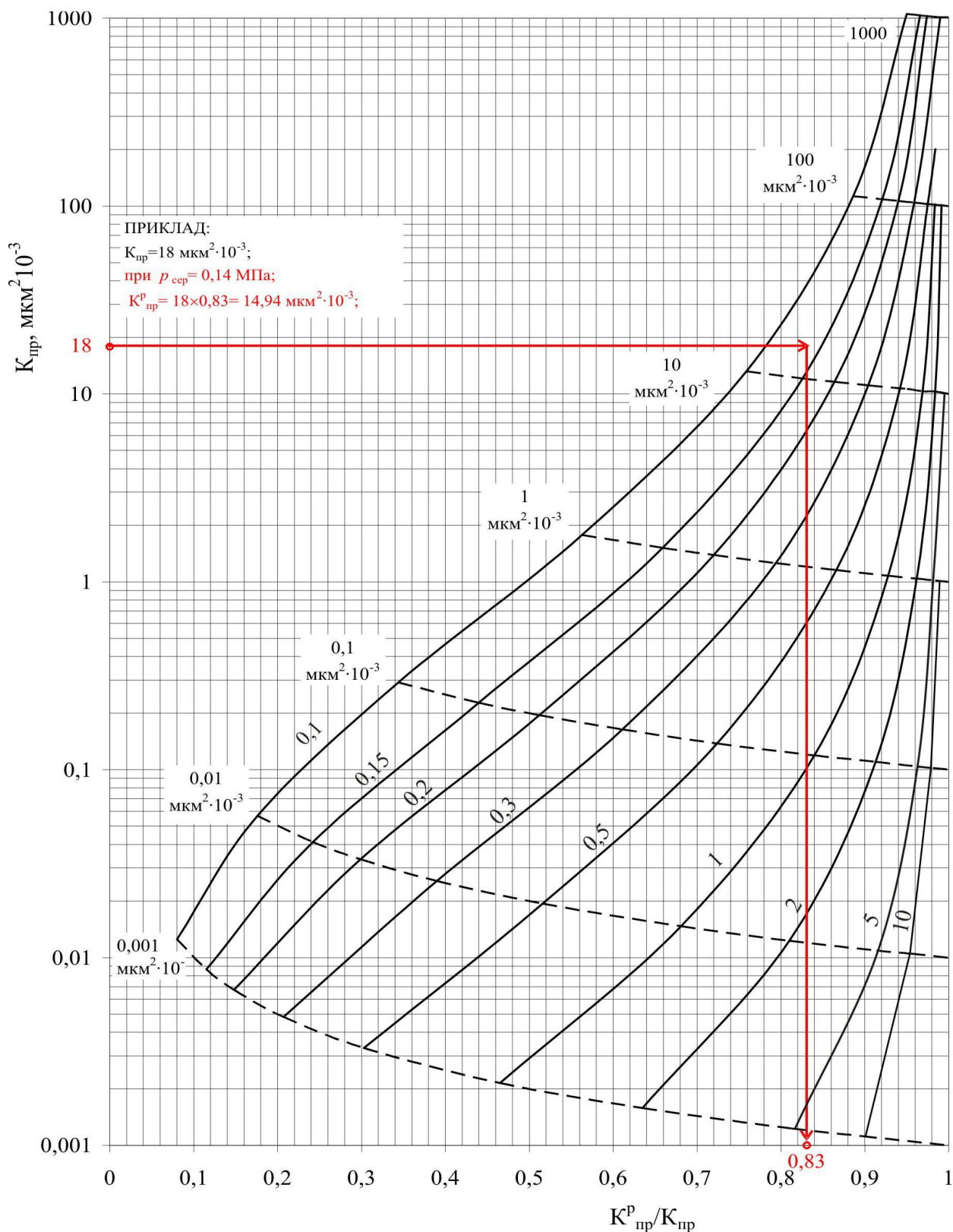
Згідно із запропонованою вище схемою нами розраховано співвідношення $K_{пр}^p / K_{пр}$ для середніх тисків, менших за 0,1 МПа (аж до 0,01 МПа включно), тобто для умов значного, але не надто глибокого вакууму (таблиця 2). За цими даними побудовано графік ймовірних поправок (рис. 3) для порід-колекторів з абсолютною газопроникністю в межах (0,01 – 1000) $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$. Графіком можна скористатися під час вимірювання газопроникності за схемою перетоків при нестационарній фільтрації газу в умовах неглибокого вакууму – від кількох десятків до сотень мм рт. ст. нижче 0,1 МПа – з використанням скляних вимірювальних пристроїв (п'єзометрів) [2, 4, 9]. Для з'ясування практичної придатності аналогічних розрахунків і графічних побудов за значно нижчих середніх тисків газу потрібні спеціальні експерименти. Їх здійснення важливе для теорії низьковакуумної гідрогазодинаміки, але не актуалізується, оскільки такі умови дослідів нині не застосовують у вітчизняних лабораторіях петрофізики, а також не пов'язані з розробкою газових покладів.

Іноді висловлюється побажання виводити уточнюючі кореляції $b = f(K_{пр}^p)$ для окремих літотипів порід [2, 4, 8]. Це кожний раз потребуватиме численних дослідів на представницькій колекції, не меншій ніж із сотні зразків, однак дозволить виявити, чи такі кореляції суттєво відрізнятимуться від універсальної (2) та назаєм між собою. З практичних міркувань доцільним було б одержати окремі кореляції, наприклад, для неогенових молас і палеогенового

флішу Передкарпаття, мезозойських і палеогенових порід та ін.

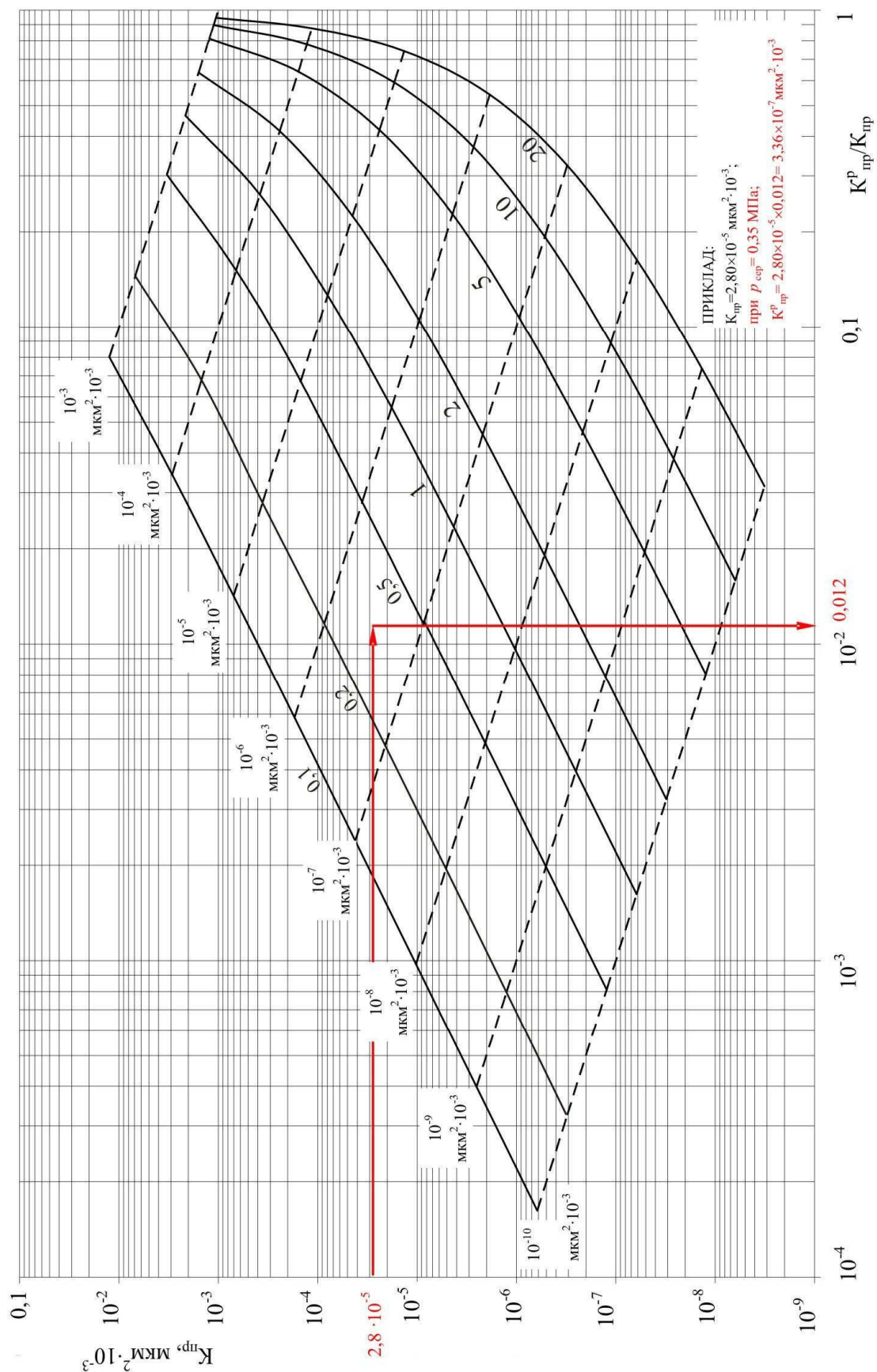
Література

- 1 Оркин К.Г. Физика нефтяного пласта / К.Г. Оркин, П.К. Кучинский. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 295 с.
- 2 Методические рекомендации по исследованию пород-коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами. – М.: ВНИГРИ, 1978. – 381 с.
- 3 Федисин В.О. Низькопористі породи-колектори промислового значення / В.О. Федисин. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 148с.
- 4 ГОСТ 26450.2–85 Порода горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 16 с.
- 5 СОУ 73.1-41-08.11.08:2006 Визначення коефіцієнта абсолютної та ефективної проникності гірських порід за стаціонарної фільтрації газу. – К.: Держгеолслужба, 2006. – 30с.
- 6 Klinkenberg L.I. The Permeability of Porous Media to Liquid and Gases.//API Drill. Prod. Pract., 1941-vol.7, №3. –P. 200-208.
- 7 Handbook of Natural Gas Engineering / D. Katz, D. Cornell, R. Kobayashi et al. – New York, Toronto, London: Mc. Crav-Hill Book Company, inc., 1959.-802p.
- 8 Jones S.C. A Rapid Accurate Unsteady-State Klinkenberg Permeameter // Soc. Petrol. Eng. J. – 1972. – vol.12, № 5. – p. 383-397.

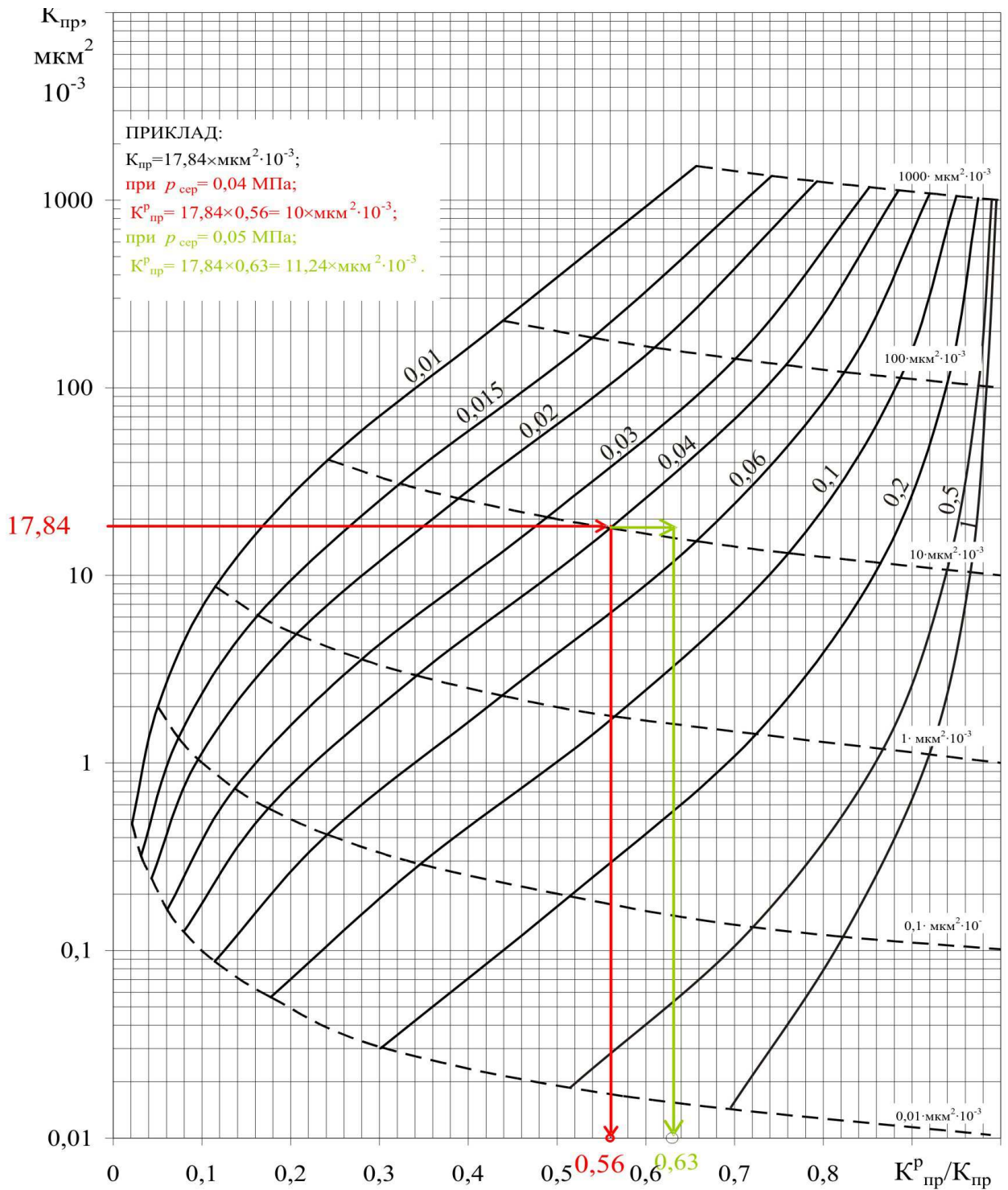


Шифри кривих: 0,1-10 – середні тиски \bar{p} у зразку, МПа;
 пунктиром – рівновеликі значення скорегованої газопроникувості $K^P_{пр}$, $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$

Рисунок 1 – Номограма поправок до поточної газопроникувості $K_{пр}$ для визначення абсолютної $K^P_{пр}$ проникності порід-колекторів



Шифри кривих: 0,1 – 20 – середні тиски $p_{ср}$ у зразку, в МПа;
 пунктиром зображені рівновеликі значення скорегованої газопроникності $K_{пр}^р$ в $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$
Рисунок 2 – Номограма поправок до поточної газопроникності $K_{пр}$ для визначення абсолютної проникності $K_{пр}^р$ порід-покришок



Шифри кривих: 0,01-1,0 – середні тиски \bar{p} у зразку, МПа;
 пунктиром – рівновеликі значення скорегованої газопроникності (азот) $K_{пр}^P$, $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$

Рисунок 3 – Номограма поправок до поточної газопроникності ($K_{пр}$) для визначення абсолютної проникності $K_{пр}^P$ (за неглибокого вакууму)

Таблиця 2 – Співвідношення K_{np}^p/K_{np} для порід-колекторів відносно середніх тисків у межах 0,01 + 1 МПа (за неглибокого вакууму)

K_{np}^p , мкм ² ·10 ⁻³ (мД)	$b = 0,777x$ $(K_{np}^p)^{-0,39}$, безрозм.	\bar{p} , МПа	$1/\bar{p}$, МПа ⁻¹	$K_{np} = K_{np}^p \left(1 + \frac{0,1b}{\bar{p}}\right)$, мкм ² ·10 ⁻³	$\frac{K_{np}^p}{K_{np}}$, безрозм.
1	2	3	4	5	6
1000	0,05253	0,01	100	1525,3	0,656
		0,015	66,667	1350,2	0,741
		0,02	50	1262,6	0,792
		0,03	33,33(3)	1175,1	0,851
		0,04	2,5	1131,3	0,884
		0,06	16,667	1087,6	0,919
		0,1	10	1052,5	0,950
		0,2	5	1026,3	0,974
		0,5	2	1010,5	0,990
100	0,1290	1	1	1005,2	0,995
		0,01	100	229,0	0,437
		0,015	66,667	186,0	0,538
		0,02	50	164,5	0,608
		0,03	33,33(3)	143,0	0,699
		0,04	2,5	132,2	0,756
		0,06	16,667	121,5	0,823
		0,1	10	112,9	0,886
		0,2	5	106,4	0,940
10	0,3165	0,5	2	102,6	0,975
		1	1	101,3	0,987
		0,01	100	41,65	0,240
		0,015	66,667	31,10	0,322
		0,02	50	25,82	0,387
		0,03	33,33(3)	20,55	0,487
		0,04	2,5	17,91	0,558
		0,06	16,667	15,28	0,654
		0,1	10	13,17	0,759
1	0,7770	0,2	5	11,58	0,864
		0,5	2	10,63	0,940
		1	1	10,32	0,968
		0,01	100	8,770	0,114
		0,015	66,667	6,180	0,162
		0,02	50	4,885	0,205
		0,03	33,333	3,590	0,279
		0,04	2,5	2,942	0,340
		0,06	16,667	2,295	0,436
0,1	1,9073	0,1	10	1,777	0,563
		0,2	5	1,388	0,720
		0,5	2	1,155	0,866
		1	1	1,078	0,928
		0,01	100	2,007	4,98·10 ⁻²
		0,015	66,667	1,372	7,29·10 ⁻²
		0,02	50	1,054	9,49·10 ⁻²
		0,03	33,333	0,7358	0,136
		0,04	2,5	0,5768	0,173
0,06	16,667	0,4179	0,239		
		0,1	10	0,2907	0,344
		0,2	5	0,1954	0,512
		0,5	2	0,1381	0,724
		1	1	0,1191	0,840

Закінчення табл. 2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0,01 (10^{-2})	4,6819	0,01	100	0,4782	$2,09 \cdot 10^{-2}$
		0,015	66,667	0,3221	$3,10 \cdot 10^{-2}$
		0,02	50	0,2441	$4,10 \cdot 10^{-2}$
		0,03	33,333	0,1661	$6,02 \cdot 10^{-2}$
		0,04	2,5	0,1270	$7,87 \cdot 10^{-2}$
		0,06	16,667	$8,803 \cdot 10^{-2}$	0,114
		0,1	10	$5,682 \cdot 10^{-2}$	0,176
		0,2	5	$3,341 \cdot 10^{-2}$	0,299
		0,5	2	$1,936 \cdot 10^{-2}$	0,516
		1	1	$1,468 \cdot 10^{-2}$	0,681

9 Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта: учебник для вузов / Ш.К. Гиматудинов, А.И. Ширковский. – М.: Недра, 1982. – 311 с.

10 Котяхов Ф.И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Ф.И. Котяхов. – М.: Недра, 1977. – 287 с.

11 Дерягин Б.В. Измерение удельной поверхности пористых и дисперсных тел. по сопротивлению течения разреженных газов / Б.В. Дерягин // ДАН СССР: т. 53. – №7. – С. 627-630.

12 Марморштейн Л.М. Коллекторские и экранирующие свойства осадочных пород при различных термобарических условиях / Л.М. Марморштейн. – Л.: Недра, 1975. – 159 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
18.02.13*

*Рекомендована до друку
професором **Масевським Б.И.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром геол. наук **Стефанюком Ю.В.**
(Інститут геології і геохімії НАН України,
м. Львів)*