УДК 622.279.5

Узгодження об’ємного підрахунку запасів газу з матеріальним балансом для виявлення незалучених до розробки зон

Кондрат О., *д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, oleksandr.kondrat@nung.edu.ua*
Лукін О., *аспірант, ollukin96@gmail.com*
Матіїшин Л., к.т.н., доцент, завідувач кафедри видобування нафти і газу, liliia.matiishyn@nung.edu.ua
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

Запропоновано методику швидкої оцінки запасів газу та площ дренування свердловин, яка не потребує побудови гідродинамічної моделі й спирається лише на статичні карти та історію видобутку і пластового тиску. Методика поєднує об’ємний підрахунок запасів із глибинним відсіканням газоводяного контакту (ГВК), матеріальний баланс p/z з поправкою Ramagost–Farshad на розширення породи та зв’язаної води й розподіл площ дренування за дифузійним часом. Перевизначення площ виконується розв’язанням степеневої діаграми із заданими об'ємами на основі теореми Aurenhammer–Hoffmann, що дає точний розв’язок з аналітичним градієнтом. Показано, що сума посвердловинних оцінок p/z завищує запаси на 13,6 % унаслідок взаємовпливу свердловин, тоді як корекція по об'єкту цю похибку усуває. Різниця між об’ємним підрахунком і матеріальним балансом кількісно оцінює обсяг, не залучений до розробки. На контрольованому наборі даних вона становила 0,110 млрд м³, або 10,1 % геологічних запасів. Розподіл площ дренування верифіковано зіставленням з полем міжкоміркових потоків гідродинамічного розрахунку: збіг 85 % за комірками.

Ключові слова: запаси газу, матеріальний баланс, p/z, площа дренування, дифузійний час пробігу, незалучені запаси.

Reconciliation of volumetric gas reserves with material balance for identification of undrained zones

Oleksandr Kondrat, Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vice-Rector for Research, oleksandr.kondrat@nung.edu.ua
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

A workflow is proposed for rapid estimation of gas reserves and well drainage areas that requires no reservoir simulation model and relies only on static maps and production and pressure history. It combines volumetric estimation with a depth-based gas–water contact cut-off, material balance in p/z form with the Ramagost–Farshad correction for rock and connate water expansion, and drainage-area partitioning by diffusive time of flight. Areas are redefined by solving a power diagram with prescribed capacities, based on the Aurenhammer–Hoffmann–Aronov theorem, which yields an exact solution with an analytical gradient. It is shown that summing per-well p/z estimates overstates reserves by 13.6 % owing to well interference, whereas a single-tank fit removes this bias. The difference between the volumetric estimate and material balance quantifies the volume not yet contacted by development. On a controlled dataset it amounted to 0.110 bcm, or 10.1 % of the geological reserves. The drainage partition was verified against the inter-block flux field of a reservoir simulation: 81 % cell agreement, 168 m mean boundary error.

Keywords: gas reserves, material balance, p/z, drainage area, diffusive time of flight, undrained reserves.

Вступ. Обліковані геологічні запаси газу визначають об’ємним методом за статичною моделлю родовища. Обсяг, фактично залучений до розробки, визначається динамікою пластового тиску і може суттєво відрізнятися від облікованого через обмежену гідродинамічну зв’язність і нерівномірність розміщення свердловин. Установлення цієї різниці має безпосереднє значення для обґрунтування категорій запасів і планування довидобутку.

Найповнішу відповідь дає гідродинамічне моделювання, проте його побудова потребує значних витрат часу й вихідних даних, що не завжди виправдано на етапі попереднього аналізу. Класичний матеріальний баланс дає лише інтегральну оцінку без просторової прив’язки. Виникає потреба в методиці проміжного рівня, яка поєднує обидва підходи.

Мета роботи перевірити методику, що узгоджує об’ємний підрахунок запасів газу з матеріальним балансом, кількісно оцінює не залучений до розробки обсяг, не вимагаючи побудови гідродинамічної моделі.

Методика. Розрахунок виконується у шість етапів на двовимірній площинній сітці за загальною схемою (рис. 1).

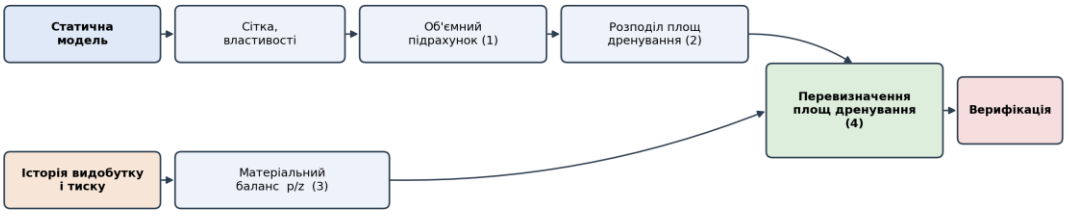

Рис. 1. Загальна схема розрахунку. Числа у дужках відповідають номерам формул (1)–(4)

На першому та другому етапах формується сітка, розміщуються свердловини й заповнюються властивості з контролем кондицій (рис. 2). Газоводяний контакт заданий абсолютною відміткою, а не порогом за водонасиченістю, що дає коректний нуль газонасиченої товщини нижче контакту.

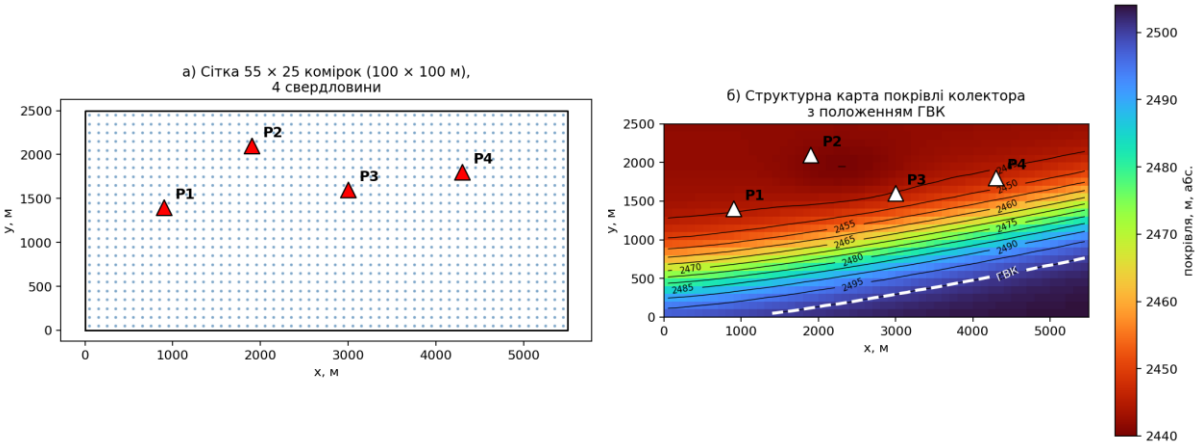

Рис. 2. Побудова двовимірної моделі: а) сітка і розміщення свердловин; б) структурна карта покрівлі колектора з положенням ГВК

Третій етап — об’ємний підрахунок запасів. Газонасичена товщина визначається глибинним відсіканням контакту (рис. 3):

$$h_g = \min(\max(z_c - z_t,\ 0),\ h)$$

$$G = \frac{h_g\, NTG\, \varphi\, (1 - S_w)\, A}{B_g} \qquad (1)$$

де z_ГВК і z_покр — абсолютні відмітки контакту й покрівлі, h_заг — загальна товщина, NTG — коефіцієнт піщанистості, φ — пористість, S_w — водонасиченість газонасиченої частини розрізу, A — площа комірки, B_g — об’ємний коефіцієнт газу, розрахований за кореляцією Dranchuk–Abou-Kassem [1].

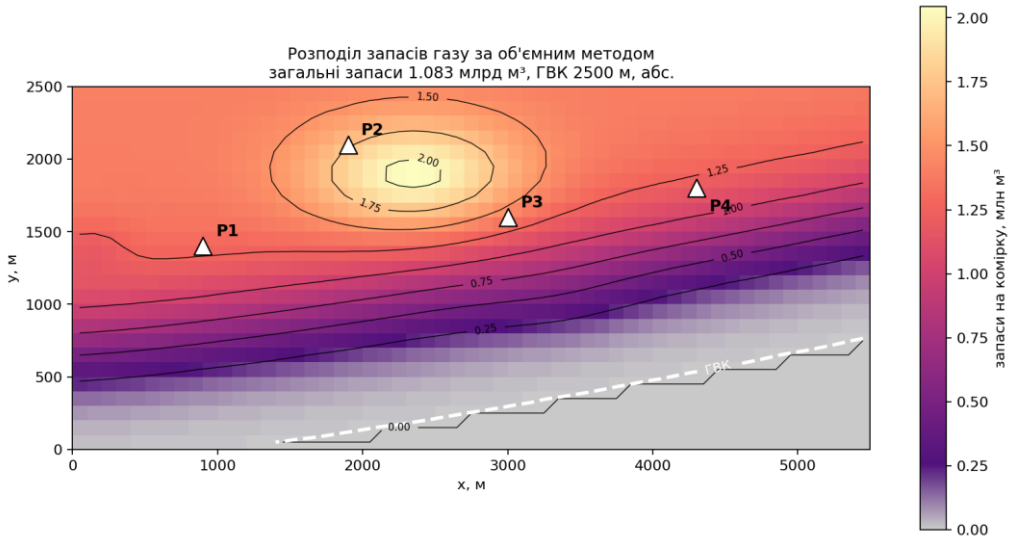

Рис. 3. Розподіл запасів газу за об’ємним методом

Четвертий етап — розподіл площ дренування за дифузійним часом пробігу τ, який є асимптотичним розв’язком рівняння п’єзопровідності [2, 3] і задовольняє рівняння ейконала:

$$|\nabla \tau|^2 = \frac{\varphi \mu c_t}{k} \qquad (2)$$

де μ — в’язкість газу, c_t — загальна стисливість, k — проникність. Рівняння розв’язується алгоритмом Дейкстри з багатьма джерелами на графі комірок; неактивні комірки виступають бар’єрами. Комірка відноситься до тієї свердловини, фронт якої досягає її першим. Швидкість поширення визначається відношенням k/(φ·μ·c_t) і не залежить від товщини: товщина входить в об’єм, а не в дифузію.

П’ятий етап — матеріальний баланс. Для кожної свердловини (рис. 4) та для покладу як єдиного резервуара (рис. 5) підганяється пряма p/z у формі Havlena–Odeh [4] з поправкою Ramagost–Farshad [5] на розширення породи та зв’язаної води:

$$\frac{p}{z}[1 - c_e(p_i - p)] = \frac{p_i}{z_i}\left(1 - \frac{G_p}{G}\right) \qquad (3)$$

$$c_e = \frac{c_w S_{wc} + c_f}{1 - S_{wc}}$$

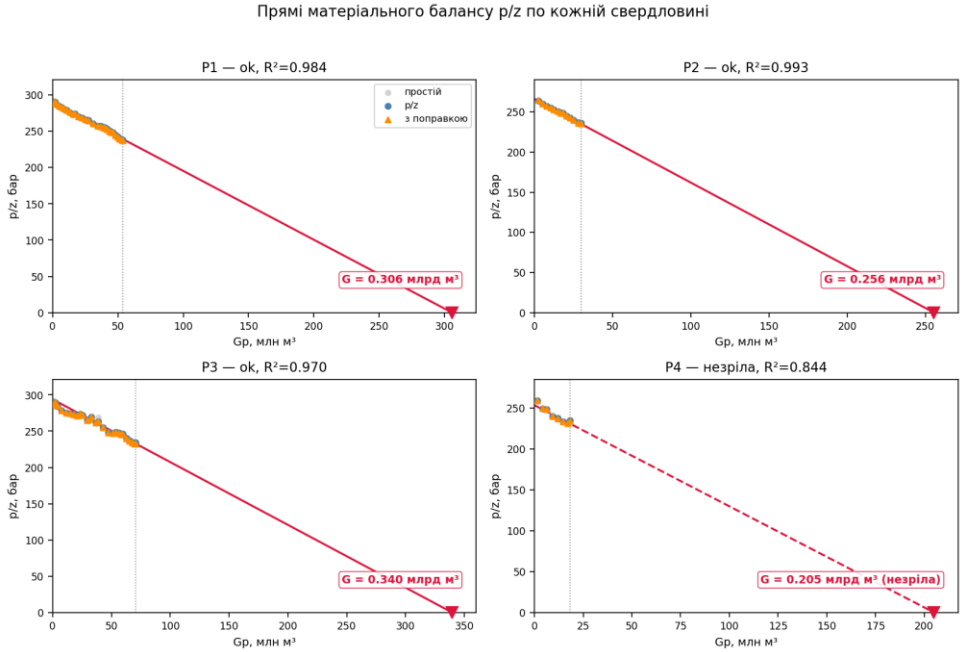

Рис. 4. Прямі матеріального балансу p/z по кожній свердловині

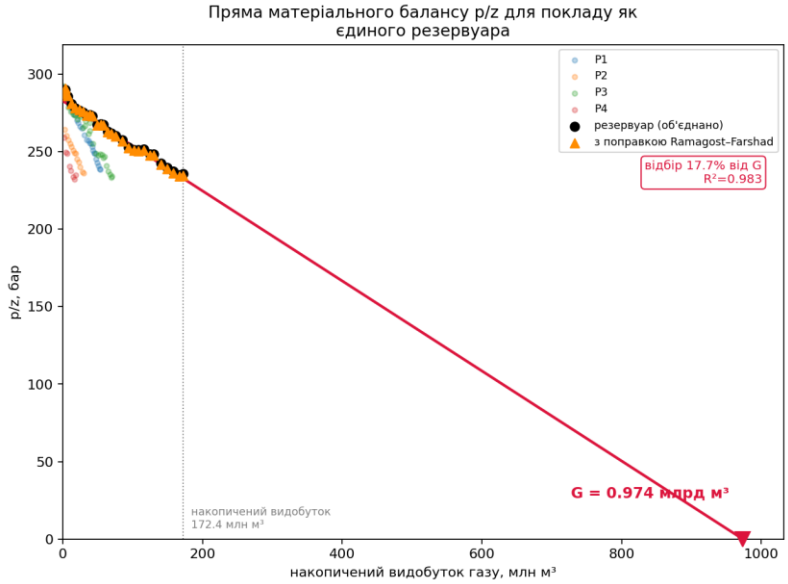

Рис. 5. Пряма матеріального балансу p/z для покладу як єдиного резервуара. Кольоровими точками — окремі свердловини, чорним — об'єднані резервуарні точки

Шостий етап — перевизначення площ дренування розв'язанням степеневої діаграми із заданими місткостями. За теоремою Aurenhammer–Hoffmann [6] ваги, що забезпечують задані об'єми комірок, існують, єдині з точністю до адитивної сталої й максимізують увігнутий потенціал, градієнт якого дорівнює нев'язці за об'ємом:

$$\Phi(w) = \sum_i w_i G_i + \int \min_i \left(|x - s_i|^2 - w_i \right) d\mu$$
$$\frac{\partial \Phi}{\partial w_i} = G_i - V_i(w) \qquad (4)$$

Це дає точний розв'язок з аналітичним градієнтом замість безпохідного пошуку: збіжність досягається за 15–20 ітерацій з нев'язкою менше 0,5 %.

Результати. Методику апробовано на контрольованому наборі даних: сітка 55 × 25 комірок розміром 100 × 100 м, чотири видобувні свердловини, історія 29 місяців, накопичений видобуток 0,172 млрд м³. Об'ємний підрахунок дав 1,083 млрд м³ геологічних запасів.

Посвердловинні оцінки p/z у сумі становлять 1,106 млрд м³, тоді як резервуарна підгонка дає 0,974 млрд м³ (R^2 = 0,983). Розбіжність 13,6 % має системний характер: власна пряма p/z кожної свердловини відображає падіння тиску, спричинене всіма свердловинами, тоді як на осі абсцис відкладено лише її власний видобуток. У гідродинамічно зв'язаному покладі підсумовування посвердловинних оцінок подвійно враховує взаємовплив, і коректною є саме резервуарна оцінка. Поправка Ramagost–Farshad додатково зменшує оцінку на 2,6 %; її пропуск робить пряму p/z пологішою і систематично завищує запаси.

Різниця між об'ємним підрахунком і матеріальним балансом становить 0,110 млрд м³, або 10,1 % геологічних запасів. Це обсяг, якого не досяг баричний відгук жодної свердловини; увесь він розміщений вище газоводяного контакту. Зведені результати за всіма етапами наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння результатів за етапами розрахунку

Свердловина	Об’ємний підрахунок, млрд м³	Матеріальний баланс p/z, млрд м³	Після перевизначення, млрд м³	Площа дренування, км²
P1	0,317	0,306	0,300	3,84
P2	0,255	0,256	0,249	1,64
P3	0,248	0,340	0,333	4,85
P4	0,265	0,205	0,201	3,42
Разом / поклад	**1,083**	**0,974[1]**	**1,083[2]**	**13,75**

[1] Резервуарна оцінка для покладу як єдиного цілого (не сума значень по стовпцю, яка через взаємовплив свердловин становить 1,106 млрд м³ — див. текст). [2] Сума після перевизначення дорівнює об’ємному підрахунку за побудовою: перерозподіляється той самий обсяг.

Верифікація. Отриманий розподіл площ зіставлено з полем міжкоміркових потоків гідродинамічного розрахунку. Для кожної комірки виконано простеження вниз за домінуючим потоком до свердловини; отримана границя є поверхнею, через яку чистий потік дорівнює нулю, тобто строгим означенням границі дренування. Додатково границі перевірено лініями течії (рис. 6). Збіг за комірками становить 81 %, середня похибка положення границі — 168 м.

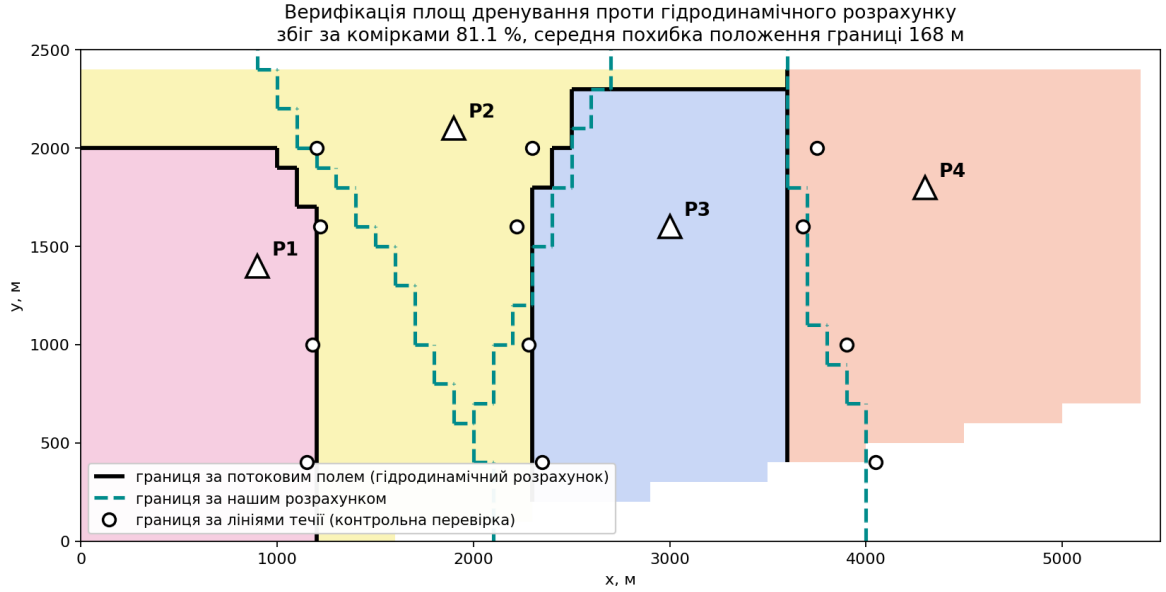

Рис. 6. Верифікація площ дренування: зіставлення розрахованих меж (бірюзовим пунктиром) з границею за потоковим полем гідродинамічного розрахунку (чорним) і положенням меж за лініями течії (білі кружки)

Новизна. Уперше для задачі розподілу площ дренування застосовано теорему Aurenhammer–Hoffmann–Aronov, що замінює евристичну оптимізацію точним розв’язком. Кількісно показано систематичне завищення запасів при підсумовуванні посвердловинних оцінок p/z. Запропоновано спосіб оцінки не залученого до розробки обсягу без побудови гідродинамічної моделі.

Висновки. 1. Узгодження об’ємного підрахунку з матеріальним балансом дає кількісну оцінку обсягу, не залученого до розробки; на досліджуваному наборі вона становила 10,1 % геологічних запасів.

2. Підсумовування посвердловинних оцінок p/z завищує запаси на 13,6 % через взаємовплив свердловин; коректною є резервуарна підгонка.

3. Розподіл площ дренування за дифузійним часом пробігу узгоджується з гідродинамічним розрахунком на рівні 85 % за комірками.

4. Методика не потребує гідродинамічної моделі й може застосовуватися на етапі попереднього аналізу як джерело вихідних даних для подальшої адаптації моделі до історії розробки.

Список використаних джерел:

1. Dranchuk P.M., Abou-Kassem J.H. Calculation of Z factors for natural gases using equations of state. Journal of Canadian Petroleum Technology. 1975. Vol. 14, No. 3. P. 34–36.
2. Vasco D.W., Keers H., Karasaki K. Estimation of reservoir properties using transient pressure data: an asymptotic approach. Water Resources Research. 2000. Vol. 36, No. 12. P. 3447–3465.
3. Datta-Gupta A., Xie J., Gupta N., King M.J., Lee W.J. Radius of investigation and its generalization to unconventional reservoirs. Journal of Petroleum Technology. 2011. Vol. 63, No. 7. P. 52–55.
4. Havlena D., Odeh A.S. The material balance as an equation of a straight line. Journal of Petroleum Technology. 1963. Vol. 15, No. 8. P. 896–900.
5. Ramagost B.P., Farshad F.F. P/Z abnormally pressured gas reservoirs. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 1981. SPE-10125-MS.
6. Aurenhammer F., Hoffmann F., Aronov B. Minkowski-type theorems and least-squares clustering. Algorithmica. 1998. Vol. 20, No. 1. P. 61–76.