

- соединениях газопроводов // Двенадцатая международная деловая встреча “Диагностика – 2002”. – Том 3.– Часть 2. – Турция. – 2002. – С. 103-107.
7. Подстригач Я.С., Осадчук В.А., Марголин А.М. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наук. думка, 1991. – 296 с.
 8. Осадчук В.А. Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2003. – 46, № 1. – С. 88-104.
 9. Подстригач Я.С., Осадчук В.А. Исследование напряженного состояния цилиндрических оболочек, обусловленного заданным тензором несовместных деформаций и его приложение к определению сварочных напряжений // Физ.-хим. механика материалов. – 1968. – 4, № 4. – С. 400-407.

УДК 622.691.24

З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ЦИКЛІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПСГ

© П.Р. Гімер, Р.В. Кохтюк

ІФНТУНГ, 15, вул. Карпатська, м. Івано-Франківськ, 76019. E-mail: gidro@nung.edu.ua

Рассматривается развитие такого метода анализа циклической эксплуатации ПХГ как метод годографа (гистерезисных диаграмм). Раскрывается суть метода, разновидности годографов и способы их использования для газодинамического контроля и анализа формирования и эксплуатации ПХГ

Such method of UGSF cyclic operation analysis as a hodograph (hysteresis diagrams) method is considered. The essence of this method, variety of hodographs and ways of their use for gasdynamic control and analysis of UGSF creation and operation are expanded.

В останні роки як в Україні, так і за кордоном все більш широко використовуються діаграми циклічної експлуатації ПСГ побудовані в площині годографа, які узагальнюють залежність між зведеним пластовим тиском і сумарним об'ємом газу в сховищі [3, 5, 9]. Ці діаграми інколи називають гістерезисними тому, що вони нагадують відому петлю гістерезиса, тобто петлю, яка є замкнутою. Дані діаграми можуть бути побудовані як в координатах зведеного пластового тиску від сумарного об'єму газу в сховищі, так і в координатах зведеного пластового тиску від маси газу в сховищі [10, 11].

Метод годографа для ПСГ вперше був розроблений в 1968 р. в УкрНДІгазі при аналізі формування штучного покладу газу у водоносному пласті Олешівського газосховища. Графіки залежності зведеного тиску від об'єму відібраного газу і раніше використовувались у практиці експлуатації газових родовищ. А.В. Баранов і В.Е. Карачинський запропонували розширити цей метод для циклічної експлуатації підземних сховищ газу [1]. Для цього вони побудували годограф роботи ПСГ в координатах масова кількість газу в сховищі (M) (вісь ординат) – зведений пластовий тиск ($p_{зв}$) (вісь абсцис):

$$M = f(p_{зв}) \quad (1)$$

Ці графічні залежності пропонувалось використовувати для контролю за створенням і експлуатацією сховища. Окрім того, було запропоновано використовувати годограф і на етапі проектування газових сховищ.

Подальший розвиток методу годографа набув у 70-х роках при аналізі циклічної експлуатації Дашавського підземного сховища газу в покладі Г, на початку 80-х років при аналізі циклічної експлуатації покладів IV, V і VI горизонтів Опарського родовища, у зв'язку з корективами технологічної схеми створення Опарського ПСГ [2].

Оскільки в покладі підземного сховища газу пластова температура практично постійна, буде справедливим співвідношення

$$M(t) = \rho_{нз} \cdot V_{нз} = \rho_{см} \cdot V_{см}, \quad (2)$$

де ρ_{nl} і ρ_{cm} – густина газу відповідно за пластових і стандартних умов; V_{nl} – об'єм газу за пластових умов; V_{cm} – об'єм газу за стандартних умов.

Тоді, враховуючи залежність (2) з рівняння стану реального газу можна отримати такий вираз для зведеного пластового тиску $p_{зв}$:

$$p_{зв} = \frac{p_{nl}}{z} = \frac{(\rho_{cm} \cdot R \cdot T_{nl})}{V_{nl}} \cdot V_{cm}, \quad (3)$$

де p_{nl} – середній пластовий тиск; R – універсальна газова стала, T_{nl} – абсолютна пластова температура газу в пласті.

Тому для аналізу роботи ПСГ будували годограф у вигляді функції $p_{зв} = f(V_{cm})$. Це дозволяло зменшити об'єми обробки промислових даних. У 90-х роках минулого століття В.Е. Карачинський назвав такий годограф "стандартним". Дана назва пояснюється тим, що об'єм газу в сховищі зведений до стандартних умов.

Такий спосіб обробки даних циклічної експлуатації ПСГ був використаний в роботах Р.Ф. Гімера [2, 3], в яких проводились дослідження підземних сховищ газу Передкарпаття за допомогою гістерезисних діаграм. У них гістерезисні діаграми теж побудовані в координатах зведеного тиску та сумарного об'єму газу в сховищі.

Ці діаграми дають можливість оцінити реальну кількість газу на момент дослідження незалежно від книжних даних і про наявність газу в ПСГ. Так, на основі аналізу гістерезисних діаграм була виявлена розбіжність між об'ємом газу, що був накопичений в період нагнітання, та відібраним газом, тобто в перевищені накопиченого газу над відібраним для Дашавського ПСГ. Отримана суттєва різниця в балансі газу пояснюється, насамперед, заповненням мало проникливих крайніх пропластків, внаслідок місцевих перетікань газу між свердловинами, через негерметичність свердловин (нещільності цементного кільця) [3, 5]. З іншого боку гістерезисні діаграми дозволяють засвідчити стабілізацію порового об'єму та участь у роботі всього або частини газонасиченого порового об'єму пласта. Ці роботи підтвердили доцільність побудови гістерезисних діаграм за даними циклічної експлуатації ПСГ для оцінки, як запасів газу, так і стану сховища в цілому.

Останніми роками роботами ряду дослідників був поновлений інтерес до використання методу годографа з метою проведення моніторингу ПСГ.

Досить детальний опис використання цього методу дається в роботі М.Р. Тека [12]. Фактично ним використовується метод стандартного годографа у вигляді графіків $p_{зв} = f(V_{cm})$, які він називає "гістерезисними діаграмами". На основі цих діаграм проводиться аналіз циклічної експлуатації газосховищ і дається короткотерміновий прогноз параметрів їх роботи. В книзі показані характерні форми годографів для ПСГ, що працюють у газовому або у пружноводонапірному режимах. Показано вплив на форму цих кривих одноразових чи постійних втрат газу, перетікання газу. Пропонуються шляхи використання цих діаграм для аналізу роботи ПСГ.

У статті М.В. Лур'є [5], вказується на можливість оцінки поведінки ПСГ за допомогою гістерезисних діаграм у площині годографа залежності зведеного пластового тиску (p_{nl}/z_{nl}) та маси газу (M), аналогічно до того як це було запропоновано А.В. Барановим та В.Е. Карачинським. Відмінність даного типу гістерезисних діаграм від попереднього вигляду є те, що об'єм газу в сховищі зведений до пластових умов. Основне рівняння має вигляд

$$M = \frac{V_n}{R \cdot T} \cdot \frac{p_{nl}}{z} \quad (4)$$

де M – маса газу, V_n – поровий об'єм, p_{nl} – пластовий тиск, z – коефіцієнт стисливості газу, R – універсальна газова стала, T – абсолютна температура газу.

У даній статті підкреслюється, що замкнений контур цих діаграм є граничним циклом ПСГ. Якщо гістерезисні діаграми є замкненими, то це свідчить про збереження маси газу в сховищі, коли вони розгорнуті, то це вказує на розширення підземного сховища газу, а якщо протягом певного періоду часу циклічної експлуатації ПСГ вони мають форму спіралі, то це говорить про наявність втрат газу.

Гістерезисні діаграми складаються з двох криволінійних ділянок – період нагнітання та відбирання газу, і двох прямолінійних ділянок – період простою між періодами нагнітання та відбирання газу, і відбирання та нагнітання газу. Як правило другий є меншим, тому і прямолінійна ділянка є коротшою. Тангенси кутів нахилу дотичних криволінійних ділянок проведених із початку координат, пропорційні відповідно мінімальному та максимальному об'ємам сховища. Головна особли-

вість даних діаграм є наявність петель, які зумовлені втратами акумульованої енергії тиску газу. У статті, М.В. Лур'є відзначив, що площа гістерезисних діаграм дає можливість оцінити економічність вибраного режиму експлуатації ПСГ. При чому, чим більша площа гістерезисних діаграм тим більші втрати енергії тиску газу, і навпаки чим менша площа, тим менші втрати енергії тиску газу. Також за допомогою цих діаграм можна проводити моніторинг параметрів ПСГ, який дозволяє встановити наявність витікання газу. Таким чином гістерезисні діаграми дають можливість проводити моніторинг параметрів підземного сховища газу для прогнозування не тільки втрат (витікань, перетікань) газу, а також для визначення поведінки ПСГ загалом.

У статті В.Е. Карачинського [7] також обґрунтовується доцільність використання гістерезисних діаграм. На основі аналізу годографів, побудованих за даними циклічної експлуатації ПСГ, проводиться класифікація газосховища на три основні типи. Це підземні сховища ізохорного типу, для яких характерними є постійний або малозмінний об'єм порового простору заповненого газом, ПСГ ізобарного типу, для яких пластовий тиск впродовж циклу міняється дуже мало за рахунок зміни об'єму порового простору, та ПСГ проміжного типу. Як бачимо ще одна особливість даних гістерезисних діаграм дала можливість проводити класифікацію підземних сховищ газу з наступним віднесенням їх до певного типу.

У своїх наступних роботах М.В. Лур'є продовжив вивчення можливого використання методу годографа стосовно моніторингу роботи ПСГ [10]. Аналіз ведеться на основі діаграм, побудованих у координатах об'єму газу в ПСГ за стандартних умов ($V_{ПСГ}$) та зведеного пластового тиску (p_{nr}/z_{nr}) [9, 10]. Після побудови гістерезисних діаграм за реальними даними циклічної експлуатації деякого ПСГ було виявлено перевищення об'ємів газу, який нагнітався, над об'ємами відібраного газу і, як наслідок таких змін, велика кількість газу перейшла із активного стану в буферний. М.В. Лур'є в даній праці зауважив, що гістерезисні діаграми можуть мати різний характер та, відповідно, різну поведінку. Різна поведінка гістерезисних діаграм може бути внаслідок того, що в ході циклічної експлуатації ПСГ втрачається деяка кількість газу через дефекти в покрівлі пласта і, таким чином, підземне сховище газу не зможе вийти на усталений режим циклічної експлуатації. Ще одна причина такої поведінки пов'язана з витіканням газу за межі склепінного підняття сховища. Таким чином у даній статті М.В. Лур'є відзначив доцільність використання гістерезисних діаграм для проведення інвентаризації наявного газу в ПСГ не тільки з метою встановлення розбіжності між реальною і обліковою кількістю газу в пласті, а й для проведення дослідження причин втрат газу.

В іншій праці М.В. Лур'є та А.С. Дідковської наводиться приклад використання гістерезисних діаграм для проведення оцінки запасів газу в ПСГ [11]. Описується принцип побудови гістерезисних діаграм за результатами циклічної експлуатації ПСГ. У процесі нагнітання газу об'єм газу в сховищі зростає і, як наслідок, зростає зведений пластовий тиск. Між періодами нагнітання та відбирання газу переважно існують періоди простою, внаслідок чого зведений пластовий тиск протягом даного періоду знижується, оскільки газ рухається до периферії продовжуючи витіснити пластову воду внаслідок переваги тиску газу над тиском пластової води. У процесі відбирання газу ми спостерігаємо зворотній процес – зі зменшенням об'єму газу зведений пластовий тиск також зменшується. У наступний після цього період простою, витіснена вода починає заповнювати вільні пори, тоді зведений пластовий тиск зростатиме внаслідок переваги тиску води над тиском газу. Таким чином проводиться замикання даного циклу. М.В. Лур'є доводить у своїй праці, що насправді гістерезисні діаграми не є замкнутими до того моменту коли підземне сховище газу не виведуть на усталений режим циклічної експлуатації, оскільки об'єм буферного газу в період формування ПСГ є величиною змінною. М.В. Лур'є вказує на доцільність використання даних діаграм для виявлення тої кількості буферного газу, яка забезпечить вихід необхідної кількості активного газу в період відбирання. Використовуючи дану методику для визначення об'єму працюючого буферного газу Лур'є пропонує знаходити на осі ординат таку точку за якої дотичні проведені від неї до гістерезисної діаграми мали б спільну абсцису – дана точка і визначає величину втрат буферного газу.

Поряд з розглянутими годографами було розроблено і запропоновано використовувати ще один вид годографів, який називається енергетичним, для газогідродинамічного контролю та аналізу формування і експлуатації ПСГ за промисловими даними [6, 7, 8, 9]. Енергетичний годограф визначається залежністю тиску від пластового об'єму сховища. Даний вид годографа дозволяє визначити втрати енергії на створення штучного газового покладу, тобто витрати відповідної кількості газу, який необхідний для виконання роботи, що витрачається на формування та зміну пластового об'єму газового покладу під час експлуатації підземного сховища газу. Частково втрати енергії компенсуються за рахунок зменшення об'єму штучного газового покладу протягом циклічної експлуатації

під дією накопиченого надлишку пластової енергії. Як бачимо для побудови даного годографа необхідно об'єм газу в сховищі зводити до пластових умов, що є незручним на виробництві, оскільки практично всі дані зводяться до стандартних умов.

Література

1. *А.В Баранов, В.Е. Карачинський.* Использование метода экспериментального изучения движения газового объема в пластовых условиях подземных хранилищ газа // Развитие газовой промышленности Укр. ССР – М.: Недра, 1971, выпуск VI (II). – С. 114-118.
2. *Гімер Р.Ф., Романюк В.И., Григораши Г.Г., Городивский Л.В.* Коррективы технологической схемы создания ПХГ Опары. Номер Госрегистрации 01830037261.– Івано-Франківськ, 1984.– 135 с.
3. *Гімер Р.Ф.* Развитие методов проектирования, создания и эксплуатации подземных газохранилищ в истощенных залежах. Дис... д.т.н. – Івано-Франковськ, 1986. – 325 с.
4. *Гімер Р.Ф., Гімер П.Р., Деркач М.П.* Підземне зберігання газу. – Івано-Франківськ: Факел, 2001. – 215 с.
5. *Лурье М.В.* Предельные циклы подземных газохранилищ // Газовая промышленность. – 1997. – №12. – С. 42-44.
6. *Карачинський В.Е.* Энергетические циклы подземных хранилищ природного газа // Нафта і газ України. Збірник наукових праць. Матеріали 5 Міжнародної конференції “Нафта-Газ України – 98”, Полтава, 1998. Том 2. – С. 283-284.
7. *Карачинський В.Е., Савкив Б.П., Федутенко А.Н., Фык И.М.* Геотехнологические аспекты формирования системы подземных газохранилищ Украины // НТЗ “50 лет ВНИИГазу - 40 лет ПХГ”, Москва: ВНИИГаз, 1998. – С. 54-70.
8. *Карачинський В.Е.* Енергетичні цикли підземних газосховищ ізобарного та ізохорного типу // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №6. – С. 52-55.
9. *Лурье М.В.* Механика подземного хранения газа в водоносных пластах. – М.: Нефть и газ, 2001. – 350 с.
10. *Лурье М.В., Дидковская А.С.* Инвентаризация газа в ПХГ // Газовая промышленность. – 2002. – №2. – С. 74-76.
11. *Лурье М.В., Дидковская А.С.* Оценка запасов газа в ПХГ по данным о его эксплуатации // Газовая промышленность. – 2003. – №2. – С. 66-70.
12. *Tek M.R.* Natural Gas Underground Storage: Inventory and Deliverability. – Penn-Well Publishing Co., 1996. – 425 p.