

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКИ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ КОНТУРНОЇ ВОДИ ТА ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ У ЗВ'ЯЗКУ З ЇХ ВИБІРКОВИМ ОБВОДНЕННЯМ

В. М. Абеленцев¹, М. М. Пеліхатий²

¹Український науково-дослідний інститут природних газів,
²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Україна

Надійшла до редакції 28. 03. 2014

У даній статті розглянуто дослідження фізики процесу взаємодії контурної води та газових покладів у зв'язку з їх вибіркоким обводненням. Запропоновано нову комплексну математичну методику дослідження процесів надходження контурних пластових вод у поклади газу, які характеризуються різкою мінливістю літології і фільтраційно-ємнісних властивостей за площею і розрізом покладу. Запропонована математична база може використовуватись для прогнозування ймовірності, характеру і темпів обводнення об'єктів, як ще до початку їх розробки так і об'єктів, які розробляються.

Ключові слова: контурні води, поклади вуглеводнів, обводнення, прогнозування.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНТУРНОЙ ВОДЫ И ГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В СВЯЗИ С ИХ ВЫБОРОЧНЫМ ОБВОДНЕНИЕМ

В. Н. Абеленцев, Н. М. Пелихатый

В данной статье рассмотрены исследования физики процесса взаимодействия контурной воды и газовых залежей в связи с их выборочным обводнением. Предложена новая комплексная математическая методика исследования процессов поступления контурных пластовых вод в залежи газа, характеризующиеся резкой изменчивостью литологии и фильтрационно-ёмкостных свойств по площади и разрезу залежи. Предложенная математическая база может использоваться для прогнозирования вероятности, характера и темпов обводнения объектов, как ещё до начала их разработки так и объектов, которые разрабатываются.

Ключевые слова: контурные воды, залежи углеводородов, обводнение, прогнозирование.

PHYSICS RESEARCH PROCESS WATER AND INTERACTION CONTOUR GAS DEPOSITS IN CONNECTION WITH THEIR SELECTIVELY WATERED

V. N. Abelentsev, N. M. Pelikhaty

This article deals with the study of physics interaction process contouring water and gas fields due to their selective flooding. A new technique for examining a complex mathematical process proceeds contour formation water in the gas deposits, which are characterized sharp volatility lithology and filtration- capacitive properties in the area and put the cut. The mathematical framework can be used to predict the likelihood, nature and rate of irrigation facilities as before the beginning of their development and facilities are developed.

Keywords: contour water deposits of hydrocarbons, water content, forecasting.

Важливість проблеми полягає в тому, що на багатьох родовищах газу, які перебувають в розробці, за рахунок обводнення фонд експлуатаційних свердловин зменшився

більш ніж у два рази. При цьому, на даний час в цих родовищах зосереджені значні запаси вуглеводнів. Поклади газу переважно обводнюються за механізмом вибіркового

надходження пластової води у глибину газонасиченого об'єму. Метою даної статті є дослідження фізики процесу взаємодії контурної води та газових покладів у зв'язку з їх вибірковою обводненням. Необхідність таких досліджень пов'язана з оптимізацією видобутку газу.

З аналізу геологічної будови об'єктів розробки нижньо-кам'яновугільних покладів слідує, що:

- в один експлуатаційний об'єкт об'єднані горизонти, літологічні пачки і пласти, відділені один від одного пластами глинистих або інших ущільнених порід, які простежуються, як правило, без розриву цілісності на всій площі об'єкту;
- горизонти, пачки і пласти характеризуються різною літологічною мінливістю (неоднорідністю) за площиною і розміром (ущільнення, заміщення);
- горизонти, пачки і пласти характеризуються різкою мінливістю (неоднорідністю) фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЄВ) за площею і розміром, особливо ефективної товщини, проникності і гідропровідності.

З аналізу розробки об'єктів випливає, що:

- об'єднані в один експлуатаційний об'єкт продуктивні пачки і пласти дреноються нерівномірно і характеризуються різними значеннями поточних пластових тисків. Це можна пояснити трьома особливостями геологічної будови об'єктів, викладеними вище;
- за периметром об'єкта на межі розділу газ-вода пластові тиски також диференційовані, в результаті чого формуються різні за значенням перепади поточних пластових тисків між газо- і водонасиченими середовищами.

З аналізу обводнення випливає, що:

- експлуатаційні об'єкти та свердловини обводнюються переважно за механізмом локального вибіркового надходження крайової пластової води на окремих ділянках об'єктів у малопотужних (до 15—20 % від загальної товщини пласта) прошарках, інша частина товщини пласта продовжує залишатися газонасиченою і газовіддаючою;

- на інших ділянках покладу контур газ-вода може залишатися нерухомим і підніматися на незначну (10—20 м) висоту.

Для дослідження фізико-математичного механізму нерівномірного вибіркового обводнення покладів газу необхідно вирішити пряму задачу — встановити характер вибіркового надходження контурної пластової води у газонасичені об'єми та розрахувати параметри її надходження. А саме, визначити в яких ділянках по периметру і розрізу покладу зароджується вибіркоче обводнення, відслідкувати напрямок руху за площею покладу, а також розрахувати дебіт, об'єм, площу обводнення.

Запропонований методичний підхід базується на тому, що об'єкт розробки (поклад газу) по розрізу представляється не однією, а декількома збільшеними свердловинами, за простяганням яких виділяються сектори (зони). Критерієм виділення збільшених свердловин є ізоляція горизонтів, пачок і пластів один від одного за розміром об'єкта глинистими або іншими низькопроникними породами, а також різні значення поточних пластових тисків при розробці об'єкта. Критерієм виділення секторів є наявність на площі покладів ділянок із різними усередненими значеннями ФЄВ, у першу чергу гідропровідності.

Для математичного вирішення задачі просування крайової пластової води в багатопластовий поклад газу використані відомі в гідродинаміці рівняння [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Виходячи з умов запропонованого підходу, розрахунки й оцінки виконуються роздільно за кожним продуктивним горизонтом, пачкою або пластом, що складають поклад газу, тобто роздільно у кожній виділеній збільшеній свердловині. При вирішенні задачі конкретно на кожній збільшеній свердловині послідовно встановлюються наступні параметри.

1. Початковий радіус межі розділу газ-вода для кожної збільшеної свердловини (горизонту, пачки, пласта), прийнятої у вигляді півкола, визначається виразом:

$$S = \frac{\pi R_3^2 i}{360^\circ} \text{ або } S = R_3^2 \frac{\varphi}{2} \text{ звідки}$$

$$R_3 = \sqrt{\frac{2S}{\varphi}},$$

де R_3 — початковий радіус збільшеної свердловини, м;

S — площа її газонасиченості, м²;

i, φ — центральний кут півкола, відповідно, у градусах і радіанах.

2. Коефіцієнт п'єзопровідності водонасиченої її частини (за контуром газонасиченості) визначається виразом:

$$\chi = \frac{K_{\text{пр}}}{\mu(m\beta_{\text{в}} + \beta_{\text{ск}})} = \frac{K_{\text{пр}}}{\mu\beta^*},$$

де χ — коефіцієнт п'єзопровідності, м²/с;

$K_{\text{пр}}$ — середній для водоносного пласта коефіцієнт проникності, м²;

μ — динамічна в'язкість води при пластовій температурі, МПа × с;

m — коефіцієнт пористості, у частках одиниці;

$\beta_{\text{в}}$ — коефіцієнт пружності пластової води, 1/МПа;

$\beta_{\text{ск}}$ — коефіцієнт пружності кістяка (скелету) породи, 1/МПа;

β^* — коефіцієнт пружноємності водоносної частини пачки (пласта), 1/МПа.

3. Параметр Фур'є (безрозмірний час) визначається виразом:

$$f_0 = \frac{2\pi\chi t_n}{\varphi R_3^2}, \quad f_{0n-1} = \frac{2\pi\chi t_{n-1}}{\varphi R_3^2}$$

де f_0, f_{0n-1} — параметр Фур'є, безрозмірна величина;

t_n, t_{n-1} — проміжки часу, по відношенню до яких визначається пониження поточних пластових тисків на стінці збільшеної свердловини, с.

Параметр Фур'є (f_0) потрібен для визначення функції $P(f_0), P(f_{0n-1})$ на базі якої, в свою чергу, визначається дебіт надходження пластової води в збільшену свердловину.

4. Дебіт надходження пластової води в збільшену свердловину визначається на базі рівняння Ван-Евердінгена і Херста:

$$P(R_3) = P_{\text{н}} - \frac{q_{\text{вн}}\mu}{\varphi K_{\text{пр}} h} P(f_0 - f_{0n-1}),$$

звідки слідує

$$q_{\text{вн}} = \frac{K_{\text{пр}} h}{\mu} \times \frac{[P_{\text{н}} - P(R_3)] \varphi}{P(f_0 - f_{0n-1})},$$

де $q_{\text{вн}}$ — дебіт надходження пластової води в збільшену свердловину за термін

$\Delta t_n (t_n - t_{n-1})$, м³/с;

$P_{\text{н}}, P(R_3)$ — відповідно, початковий і середній поточний на термін t_n пластові тиски на стінці збільшеної свердловини (на межі розділу газ—вода), МПа;

h — середня для водоносного пласта ефективна товщина, м;

$P(f_0), P(f_{0n-1})$ — функції безрозмірного часу f_0, f_{0n-1} (параметра Фур'є), значення котрих залежить від обраної умови на зовнішній межі водоносного пласта.

Розрахунки функції $P(f_0), P(f_{0n-1})$ ускладнені, тому складені [8] таблиці їх визначення при визначених значеннях параметра Фур'є.

При розрахунках дебіту надходження пластової води в збільшену свердловину величини ефективної товщини і коефіцієнта проникності у водонасиченій частині пласта приймаються рівними їхнім середньозваженим величинам у газонасиченій частині пласта. Середній поточний пластовий тиск ($P(R_3)$) на межі розділу газ-вода визначається згідно карт ізобар.

5. Об'єм пластової води, що надійшов в збільшену свердловину за термін $\Delta t_n (t_n - t_{n-1})$, визначається виразом:

$$Q_{\text{вн}} = q_{\text{вн}} \Delta t_n.$$

Сумарний об'єм пластової води, що надійшов у збільшену свердловину до терміну t_n , визначається виразом:

$$Q_{\text{в}} = q_{\text{вн-1}} t_{n-1} + q_{\text{вн}} (t_n - t_{n-1}),$$

де $Q_{\text{в}}$ — об'єм пластової води, що надійшов, м³; t_n, t_{n-1} — проміжки часу, за який пластова вода надходила в збільшену свердловину, с.

Об'єм пластової води, що надійшов в поклад, зайняв частину раніше газонасиченого об'єму, що призвело до зменшення початкового радіуса межі поділу газ-вода.

6. Поточний радіус межі поділу газ-вода на термін t_n визначається виразом:

$$R(t_n) = \sqrt{R_3^2 - \frac{2Q_B}{\phi m h (\alpha - \alpha_{\text{зал}})}},$$

де R_3 , $R(t_n)$ — відповідно, початковий і поточний радіуси межі поділу газ-вода збільшеної свердловини, м;

h — середньозважена ефективна товщина, м;

α , $\alpha_{\text{зал}}$ — відповідно, коефіцієнти початкової і залишкової газонасиченості, част. од.

Цей вираз дозволяє врахувати неповноту витиснення газу водою. Передбачається також, що вся пластова вода, яка надійшла в збільшену свердловину, локалізована за периметром, тобто зменшення початкового радіуса відбулося за рахунок рівномірного стягування контуру газонасиченості. Така ситуація можлива лише при рівномірному підйомі площини розділу газ-вода по всьому периметру збільшеної свердловини.

7. Площа обводнення збільшеної свердловини, за умови її обводнення за рахунок підйому розділу газ-вода, розраховується на базі виразу:

$$S_K = \frac{\phi}{2} R_3^2 - \frac{\phi}{2} R^2(t_n),$$

або

$$S_K = \frac{\phi}{2} (R_3^2 - R^2(t_n)),$$

де S_K — обводнена приконтурна площа збільшеної свердловини, м²;

8. Середні значення фазової проникності для води в обводненій зоні збільшеної свердловини та ефективної водонасиченої товщини, за якою відбувалося надходження в неї пластової води, оцінюються на базі рівняння Дюпюї:

$$q_{\text{вн}} \frac{2\pi K_{\text{пр}}^{\phi} h_B}{\mu \ln \frac{R_3}{R(t_n)}} [P(R_3) - P(t_n)],$$

звідки випливає

$$K_{\text{пр}}^{\phi} h_B = \frac{q_{\text{вн}} \mu \ln \frac{R_3}{R(t_n)}}{\phi [P(R_3) - P(t_n)]},$$

де $K_{\text{пр}}^{\phi}$ — середнє значення фазової проникності для води в обводненій зоні збільшеної свердловини, м²;

h_B — середня ефективна водонасичена товщина обводненої зони, м;

q_B — дебіт надходження пластової води за термін Δt_n , м³/с;

$P(R_3)$, $P(t_n)$ — відповідно, середній поточний пластовий тиск на стінці збільшеної свердловини (на початковій межі розділу газ-вода) і середньозважений поточний пластовий тиск у газонасиченій її частині на термін t_n , МПа.

Варто зауважити, що спочатку невідомі значення фазової проникності відносно води ($K_{\text{пр}}^{\phi}$) та значення ефективної водонасиченої товщини (h_B) на базі рівняння Дюпюї обчислюються в добутку. Потім — методом послідовних наближень за таблицями Левретта підбираються такі значення $K_{\text{пр}}^{\phi}$ і розраховуються такі значення h_B , щоб при їхньому множенні отримати величину $K_{\text{пр}}^{\phi} \times h_B$, отриману на базі рівняння Дюпюї.

9. Визначення фактично обводненої площі збільшеної свердловини оцінюється на базі виразу:

$$Q_B = S m h_B (\alpha - \alpha_{\text{зал}}),$$

де

$$S_{\phi} = \frac{Q_B}{m h_B (\alpha - \alpha_{\text{зал}})}$$

S_{ϕ} — площа фактично обводненої зони (ділянки) збільшеної свердловини, м²;

Q_B — об'єм пластової води, що впровадилася, м³.

На думку авторів, визначення саме величини обводненої площі в межах збільшеної свердловини (горизонту, пачки або пласту) має принципове значення для встановлення механізму, за допомогою якого вода надійшла в газонасичений об'єм збільшеної свердловини. Очевидно, що при тому самому об'ємі впровадженної води, яка надійшла в поклад, мінімальна площа обводнення збільшеної свердловини буде, у випадку її фронтального вертикального підйому, тобто підйому ГВК, рівномірна за всім периметром покладу. Якщо фактично отримана площа обводнення перевищує можливу площу обводнення за рахунок рівномірного підйому ГВК, це є свідченням того, що на одній або декількох ділянках вода надійшла всередину збільшеної свердловини істотно далі

поточного контуру ГВК. Тобто, це свідчить про нерівномірне вибіркоче просування контуру поточного ГВК по периметру збільшеної свердловини.

10. Автори вважають, що вибіркоче (анізотропне) або рівномірне обводнення збільшеної свердловини можливо описати рівнянням:

$$K_u = \frac{S_\phi}{S_K},$$

де S_ϕ — площа фактично обводненої ділянки збільшеної свердловини, м²;

S_K — площа, яку б зайняв об'єм води, що надійшов у фактично обводнену зону, за умови її руху за механізмом рівномірного підйому ГВК (рівномірного стягування контуру газоносності);

$K_{обв.}$ — безрозмірний параметр, що автори пропонують розглядати як критерій рівномірного або нерівномірного обводнення збільшеної свердловини (покладу газу) і інтенсивності вибіркового обводнення.

Закінчимо наступними основними висновками:

- запропоновано нову комплексну і математичну методику дослідження процесів надходження контурних пластових вод у експлуатаційні об'єкти (поклади газу), які характеризуються різкою мінливістю (неоднорідністю) літології і ФЄВ за площею і розрізом;
- на відміну від існуючих, запропонована методика дозволяє встановити або спрогнозувати переважний механізм обводнення об'єкта: або це відносно рівномірний по всьому периметру об'єкта підйом газоводяного контакту, або це вибіркоче, нерівномірне по периметру об'єкта, надходження контурних пластових вод;
- математична база методики дозволяє за кожною збільшеною свердловиною і сектором послідовно оцінювати об'єми пластової води, які надходять в пласти, ефективну водонасичену товщину, площу обводнення, напрямок та швидкість руху пластових вод, кількість пластів, які обводнюються, переважний механізм їх обводнення;

- кінцева мета та особливість методики полягає не у встановленні абсолютної величини об'єму впровадженої у поклад газу пластової води, а у визначенні вибіркового характеру цього надходження за площею та розрізом покладу;
- запропонована математична база потрібна для прогнозування ймовірності, характеру і темпів обводнення об'єктів, як ще до початку їх розробки так і об'єктів, які перебувають у розробці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абасов М. Т., Оруджалиев Ф. Г. Газогидродинамика и разработка газоконденсатных месторождений. — М.: Недра, 1989.
2. Вяхирев Р. И., Галимов А. К., Леонтьев И. А. Моделирование процессов регулирования продвижения пластовой воды на Оренбургском месторождении. — Реф. сб.: Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. — М.: ВНИИГазпром, 1982, № 2. — С. 8—11.
3. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи / В. М. Ентов, А. Ф. Зазовский. — М.: Недра, 1989. — 232 с.
4. Закиров С. Н., Лапук Б. Б. Проектирование и разработка газовых месторождений. — М., «Недра», 1974. — 374 с.
5. Закиров С. Н. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений. — М.: Недра, 1989.
6. Кондрат Р. М. Газоконденсатоотдача пластов. — М.: Недра, 1992. — 255 с.
7. Коротаев Ю. П., Гуревич Г. Р., Мамовов И. — Экспериментальное изучение процесса вытеснения двухфазной углеводородной смеси водой на модели пласта. — Изв. ВУЗов: Сер. Нефть и газ, 1976, № 9. — С. 39—42.
8. Кристеа Н. Подземная гидравлика. — М.: Гостоптехиздат, 1961, Т. 1. — 343 с.
9. Правила разработки газовых и газоконденсатных месторождений. — М.: Недра, 1971. — 104 с.
10. Сливнев В. Л. Математическое моделирование процессов конусообразования при разработке газовых и газоконденсатных месторождений. — М. ИРЦ Газпром, 1995. — 94 с.
11. Шмыгля П. Т. Разработка газовых и газоконденсатных месторождений. — М., «Недра», 1971, 277 с.
12. АБЕЛЕНЦЕВ В. М. Особливості обводнення газоконденсатних та нафтових покладів родовищ Дніпровсько-Донецької западини /

В. М. Абеленцев, А. Й Лур'є, М. Ю Нестеренко // Вісн. Харк. Нац. ун-ту. — 2013, № 1084. — С. 9—14.

LITERATURA

1. Abasov M. T., Orudzhaliyev F. G. Gazogidrodinamika i razrabotka gazokondensatnyh mestorozhdenij. — M.: Nedra, 1989.
2. Vyahirev R. I., Galimov A. K., Leont'ev I. A. Modelirovanie processov regulirovaniya prodvizheniya plastovoy vody na Orenburgskom mestorozhdenii. — Ref. sb.: Ser. Razrabotka i ekspluatatsiya gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij. — M.: VNIIEgazprom, 1982, No. 2. — P. 8—11.
3. Gidrodinamika processov povysheniya nefteotdachi / V. M. Entov, A. F. Zazovskij. — M.: Nedra, 1989. — 232 p.
4. Zakirov S. N., Lapuk B. B. Proektirovanie i razrabotka gazovyh mestorozhdenij. — M., «Nedra», 1974. — 374 p.
5. Zakirov S. N. Teoriya i proektirovanie razrabotki gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij. — M.: Nedra, 1989.
6. Kondrat R. M. Gazokondensatootdacha plastov. — M.: Nedra, 1992. — 255 p.
7. Korotaev Yu. P., Gurevich G. R., Mamovov I. — Eksperimental'noe izuchenie processa vytesneniya dvuhfaznoj uglevodorodnoj smesi vodoj na modeli plasta. — Izv. VUZov: Ser. Neft' i gaz, 1976, No. 9. — P. 39—42.
8. Kristea N. Podzemnaya gidravlika. — M.: Gos- toptehizdat, 1961, Vol. 1. — 343 p.
9. Pravila razrabotki gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij. — M.: Nedra, 1971. — 104 p.
10. Slivnev V. L. Matematicheskoe modelirovanie processov konusoobrazovaniya pri razrabotke gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij. — M. IRC Gazprom, 1995. — 94 p.
11. Shmyglya P. T. Razrabotka gazovyh i gazokon- densatnyh mestorozhdenij. — M., «Nedra», 1971, 277 p.
12. Abelencev V. M. Osoblivosti obvodnennyya gazokondensatnih ta naftovih pokladiv rodovisch Dniprovs'ko-Donec'koï zapadini / V. M. Abe- lencev, A. J Lur'є, M. Yu Nesterenko // Visn. Hark. Nac. un-tu. — 2013, No. 1084. — P. 9—14.