



УДК 622.276.1/.4.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЧКИ И ДОБЫЧИ ГАЗА В ПОДЗЕМНОМ ХРАНИЛИЩЕ ГАЗА (ПХГ)

MODELING OF THE PROCESS OF GAS INJECTION AND EXTRACTION IN AN UNDERGROUND GAS STORAGE (UGS)

Ширалиев Алем Адем оглы

начальник цеха,
SOCAR, Производственное Объединение «Азнефть»,
Подземная Хранилища Газы «Калмаз»,
Shiraliyev.alam@gmail.com

Shiraliyev Alam Adam oglu

Workshop superintendent,
SOCAR, Production Union «Azneft»,
Underground Gas Storage «Kalmaz»
Shiraliyev.alam@gmail.com

Аннотация. Разработана теоретическая методика моделирования процесса закачки и отбора газа в ПХГ в соответствии с изменением значений объемного коэффициента и вязкости газа по изменению компонентного состава газовой фазы и давления, и на его основе идентифицировано регулирование работы скважин конкретного горизонта газовой залежи в сезоне закачки и отбора газа.

Annotation. A theoretical method has been developed for modeling the process of gas injection and withdrawal in UGS in accordance with the change in the values of the volumetric coefficient and gas viscosity according to the change in the component composition of the gas phase and pressure, and on its basis, the regulation of well operation of a specific horizon of a gas deposit in the gas injection and withdrawal season has been identified.

Ключевые слова: подземная хранилища газа, давление, проницаемость, пористость, газовые компоненты.

Keywords: Underground gas storage, pressure, permeability, porosity, gas components.

Введение

Подземное хранение газа относится к наиболее эффективным и экологически безопасным технологиям регулирования неравномерности газопотребления и обеспечения надежного газоснабжения промышленных и бытовых потребителей. Современные особенности работы ПХГ определяют не только выполнение сезонно ориентированных функций, но и спрос на газ и рыночную конъюнктуру, что, в свою очередь, связано с повышением производительности его устройств и технологической маневренностью системы подземного хранения. С этой точки зрения, поиск и разработка новых технологических решений в направлении повышения производительности периодической эксплуатации ПХГ считается одной из актуальных исследовательских проблем.

Постановка задачи и метод решения

Принято, что пласт-коллектор подземного газохранилища, неоднородный, с замкнутыми со всех сторон границами, эксплуатируется нагнетательными и эксплуатационными скважинами. Начальное давление пласта-коллектора p_0 , проницаемость по площади k_x, k_y , а по вертикали k_z . Требуется определить давление и другие технологические показатели разработки в пласт-коллекторе и на забое скважины.

В рамках принятых допущений задача описывается следующим нелинейным дифференциальным уравнением с частным производным и соответствующими начальными и граничными условиями [1, 2]:

$$\operatorname{div} \left[\frac{k\rho\beta}{\mu(p)Z(p)\rho_{am}} \operatorname{grad} p \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{m\rho\beta}{Z(p)\rho_{am}} \right] \pm \sum_{l=1}^s Q_l(t) \delta(x-x_l) \delta(y-y_l) \delta(z-z_l),$$

$$D = ((x, y) \in G, 0 \leq z \leq h), t \in (0, T), \tag{1}$$

$$p(x, y, z, t)|_{t=0} = p_0(x, y, z), (x, y, z) \in D, \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{\Omega} = 0, (x, y, z) \in \Omega. \tag{3}$$

Здесь m, k – соответственно коэффициент пористости и проницаемости пласта; h – толщина пласта; μ – коэффициент вязкости газа; Z – коэффициент сжимаемости газа; β – температурный поправочный коэффициент; ρ_{am}, ρ – соответственно атмосферное и пластовое давление; $\pm Q_l(t)$ – добыча газа, закачанного в пласт-коллектор и отобранного газа; $\delta(\cdot)$ – функция Дирака; G – площадь фильтрации; S – количество скважин; n – вектор нормали, проведенный к внешней границе области фильтрации; Ω – внешняя граница области фильтрации.



Для решения системы (1)–(3) применяется интегро-интерполяционный метод, и полученная разностная схема становится нелинейной из-за давления. Поэтому к нелинейным коэффициентам применялась линеаризация для однозначного определения давления из конечно-разностной схемы, а корректировка их точных значений обеспечивалась итерационным процессом [2].

Давление находится из решения следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$g_{i,j,k}^v p_{i-1,j,k}^{v+1} + c_{i,j,k}^v p_{i,j-1,k}^{v+1} + \lambda_{i,j,k}^v p_{i,j,k-1}^{v+1} + a_{i,j,k}^v p_{i,j,k}^{v+1} + f_{i,j,k}^v p_{i+1,j,k}^{v+1} + b_{i,j+1,k}^v p_{i,j+1,k}^{v+1} + \eta_{i,j,k}^v p_{i,j,k+1}^{v+1} = d_{i,j,k}^v \quad (4)$$

Коэффициенты системы определяются следующим образом:

$$g_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta x_i \Delta x_{i-1/2}} [x_{i-1/2} k_{xi-1/2,j,k}^{v+1} \phi_{i-1/2,j,k}^{v+1}], \quad c_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta y_j \Delta y_{j-1/2}} [y_{j-1/2} k_{yi,j-1/2,k}^{v+1} \phi_{i,j-1/2,k}^{v+1}],$$

$$\lambda_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta z_k \Delta z_{k-1/2}} [z_{k-1/2} k_{zi,j,k-1/2}^{v+1} \phi_{i,j,k-1/2}^{v+1}], \quad f_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta x_i \Delta x_{i+1/2}} [x_{i+1/2} k_{xi+1/2,j,k}^{v+1} \phi_{i+1/2,j,k}^{v+1}],$$

$$b_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta y_j \Delta y_{j+1/2}} [y_{j+1/2} k_{yi,j+1/2,k}^{v+1} \phi_{i,j+1/2,k}^{v+1}], \quad \eta_{i,j,k}^v = \frac{1}{\Delta z_k \Delta z_{k+1/2}} [z_{k+1/2} k_{zi,j,k+1/2}^{v+1} \phi_{i,j,k+1/2}^{v+1}],$$

$$a_{i,j}^v = -\left(g_{i,j,k}^v + c_{i,j,k}^v + \lambda_{i,j,k}^v + f_{i,j,k}^v + b_{i,j,k}^v + \eta_{i,j,k}^v\right) + \phi_{i,j,k}^v, \quad \phi_{i,j,k}^v = -\frac{1}{\Delta \tau} [B_{i,j,k}^{\prime n}],$$

$$d_{i,j,k}^v = \phi_{i,j,k}^v p_{i,j,k}^v \pm \sum_{l=1}^s Q_{l,i,j,k}^v, \quad \phi_{i,j,k}^n = \frac{p_{i,j,k}^n \beta}{\mu_{i,j,k}^n Z_{i,j,k}^n p_{at}}, \quad B_{i,j,k}^{\prime n} = \left(\frac{m_{i,j,k}^n p_{i,j,k}^n}{Z_{i,j,k}^n} \right)'$$

Во всех внутренних точках сеточных областей уравнение (4) выражается в виде матричного уравнения. Матрица имеет семидиагональную структуру, для решения системы используется итерационный точечный метод Якоби [2]. Ввиду нелинейности на каждой итерации решается уравнение давления и находится $p_{i,j}^{v+1}$ при известных значениях $p_{i,j}^n$. При достижении требуемой точности значения искомой функции последняя итерация $p_{i,j}^{n+1}$ считается решением.

При моделировании скважин функция $Q_i(t)$ моделируется на основе принятия квазистационарности потока в прискважинном областе, ограниченной окружностями с радиусами r_c $\forall r_k$ и соответствующими давлениями $p_c(t)$ $\forall p_{kc}(t)$ на них [3]:

$$Q_i(t) = \frac{2\pi h}{\ln \frac{r_k}{r_c}} \frac{p_c(t)}{p_{kc}(t)} \int \frac{k\rho\beta}{\mu(p)Z(p)\rho_{at}} dp, \quad r_k = \sqrt{\Delta x_i \Delta y_i / \pi} \quad (5)$$

Здесь $p_c(t)$ и $p_{kc}(t)$ – соответственно давление на забое и среднее давление в зоне дренирования скважины.

Для решения системы (1)–(3) значения параметров, выражающих физических свойств, входящего в них газа, должны быть рассчитаны по изменению давления, температуры и состава газа и учтены в системе уравнений. Для этого, система дифференциальных уравнений, позволяющая рассчитать физические свойства газа [1]

$$\frac{d}{dt} [V\rho_2 y_i] = \pm Q_i(t) y_i \quad i = \overline{1, N}, \quad t \in (0, T) \quad (6)$$

на основе начальных условий

$$p|_{t=0} = p_0, \quad y_i|_{t=0} = y_{i0}, \quad i = 1, 2, \dots, N - 2 \quad (7)$$

решается вместе с уравнением состояния газовой фазы [4]:



$$p = RT \left[\frac{1}{V-b} - \frac{a}{V(V+c)} \right], \quad (8)$$

здесь V – объем пористой среды; ρ_g – плотность газа; y_i – молярное количество i -го компонента в газовой фазе; N – количество компонентов газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газовой фазы; a , b и c – коэффициенты уравнения состояния.

С учетом начального известного значения ρ_c в системе уравнений (5) в соответствии с процессом закачки или отбора газа из пласта решается система дифференциальных уравнений, и исходя из нового значения определяемых переменных $y_1, y_2, \dots, y_{N-2}, p, T$ определяются значения плотности газовой фазы, соответствующие изменению давления, температуры и состава [1].

На основе указанного подхода объемный коэффициент газа ($a_g(p)$) определяется следующим образом [1]:

$$a_g(p) = \frac{\rho_{g.am}}{\rho_g(y_1, \dots, y_{N-1}, p)} = \frac{Z(p)\rho_{am}}{p\beta}.$$

Вязкость газа определяется по значению плотности газа по методу Дина и Стила [5].

На основе изменения давления и компонентного состава газовой фазы с учетом определяемых значений объемного коэффициента и вязкости газа с учетом в уравнении (1) реализуется моделирование и регулирование процесса закачки и отбора газа в ПХГ.

Собраны технологические показатели блоков I и III Калмазского подземного газохранилища и их скважин, и на основе результатов расчета системы уравнений (1)–(3), (5), (6)–(8) по суммарному объему газа необходимой потребности по сезону скорректирована карта изобар пласта по динамике объемов закачиваемого и добываемого газа.

В сезон отбора газа 2016–2017 гг. из 102 скважин, участвующих в блоках I и III Калмазского подземного газохранилища, отобрано 837447 тыс. м³ газа, а при сезоне закачки газа в эти блоки закачано 840508 тыс. м³ газа. Точнее, в период закачки газа одной скважиной ПХГ было закачано в среднем 54,935 тыс. м³ газа, а в период добычи газа эта величина составила примерно 39,2394 тыс. м³. При отборе газа давление в каждой скважине имело тенденцию к изменению с пульсационным режимом.

Выводы

Таким образом, разработана теоретическая методика моделирования процесса закачки и отбора газа в ПХГ в соответствии с изменением значений объемного коэффициента и вязкости газа по изменению компонентного состава газовой фазы и давления, и на его основе идентифицировано регулирование работы скважин конкретного горизонта газовой залежи в сезоне закачки и отбора газа.

Список литературы:

1. Фейзуллаев Х.А. Магеррамова С.Д. Моделирование процесса эксплуатации нескольких изолированных газовых пластов единой сеткой скважин в режиме истощения // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 24–28.
2. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем / Пер. с английского. – М.: Недра, 1982. – 407 с.
3. Фейзуллаев Х.А. Численное исследование задач теории нестационарной фильтрации газа и газоконденсатной смеси в пористой среде: дис. ... канд. техн. наук. – Баку, 1992. – 164 с.
4. Аббасов З.Я. Методы расчета статического динамического забойного давления в газовых и газоконденсатных скважинах. – Баку: Элм, 1993. – 312 с.
5. Многомерная и многокомпонентная фильтрация: Справочное пособие / С.Н. Закиров [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 335 с.

List of references:

1. Feyzullaev H.A. Magerramova S.D. Simulation of the exploitation of several isolated gas reservoirs by a single network of wells in the depletion mode // Azerbaijan Oil Economy. – 2016. – № 12. – P. 24–28.
2. Aziz H., Settari E. Mathematical modeling of reservoir systems / Translated from English. – M.: Nedra, 1982. – 407 p.



3. Feizullaev H.A. Numerical study of non-stationary filtration theory problems of gas and gas-condensate mixture in porous medium : Ph. Candidate of Technical Sciences. – Baku, 1992. – 164 p.
4. Abbasov Z.Y. Calculation methods of static dynamic bottomhole pressure in gas and gas-condensate wells. – Baku : Elm, 1993. – 312 p.
5. Multidimensional and multicomponent filtration: Reference book / S.N. Zakirov [and others]. – M. : Nedra, 1988. – 335 p.