

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОГО ПЛАСТА КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОРОВОГО ОБЪЕМА ЛОВУШКИ

Проведены работы по моделированию закачки газа в неоднородный пласт на имитационной модели. Цель – изучение условий по заполнению порового объема при селективной закачке по разрезу. Моделирование выполнено для условий Инчукалнского подземного хранилища газа и может являться дополнительным методом контроля за эксплуатацией хранилища. Проведение таких работ позволит оперативно оценивать и вносить соответствующие коррективы в дифференцированную закачку газа.

Ключевые слова: подземное хранение/хранилище газа, поровый объем, имитационная модель, газонасыщенная область, неоднородность пласта, ловушка.

Для изучения условий по заполнению порового объема при селективной закачке по разрезу были поставлены математические эксперименты на имитационной модели неоднородного пласта.

Математическая модель моделирует процесс совместной фильтрации газа и воды от скважины в пористой среде. Каждая фаза характеризуется фазовым давлением и насыщенностью. Подвижность каждой фазы зависит от насыщенности и описывается стандартными функциями относительной проницаемости:

$$K_z(S_z) = \left(\frac{S_z - 0,1}{0,9}\right)^{3,5} (4 - 3S_z) \text{ при } 0,1 \leq S_z \leq 1,$$

$$K_g(S_g) = \left(\frac{0,8 - S_g}{0,8}\right)^{3,5} \text{ при } 0 \leq S_g \leq 0,8. \quad (1)$$

Система уравнений для описания радиальной и вертикальной фильтрации газа и воды в неоднородной среде с учетом гравитационных сил записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r K_z(r, z) \frac{K_e(S)}{\mu e(Pe)} \rho e(Pe) \left(\frac{\partial p_e}{\partial z} - g \rho e \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] + \\ + \frac{\partial z}{\partial z} \left[K_z(r, z) \frac{K_e(S)}{\mu e(Pe)} \rho e(Pe) \left(\frac{\partial p_e}{\partial z} - g \rho e \right) \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial t} [m(p) S e(P_k) \rho e] \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь l – газ или вода, K_r , K_z – проницаемость в латеральном направлении и поперек напластования; $K(S)$ – фазовые проницаемости; $\mu(P)$ – вязкость; $\rho(P)$ – плотность; P – давление в фазе; P_k – капиллярное давление; S – насыщенность фазы; $\mu(P)$ – пористость.

Замыкающими систему уравнений (2) являются следующие соотношения:

$$\mu(P) = f(P)$$

$$\rho_{газ}(P) = \rho_{см} \frac{P}{Z(P)} \frac{T_{см}}{P_{см} T_{пл}}$$

$$\rho_{воды}(P) = \rho_{воды}^0 l^{\beta_l} (P - P_0)$$

$$m(p) = m_0 l^{\beta_p} (P - P_0)$$

$$S_{газ} + S_{воды} = 1 \quad (3)$$

$$P_k = P_{газ} - P_{воды} = \alpha_n \cos Q \sqrt{\frac{m}{k}} J(S) = P_k(S)$$

Система уравнений (1-3) является системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, получить решение которой в аналитическом виде не представляется возможным. Поэтому решение этой системы уравнений находится численными методами.

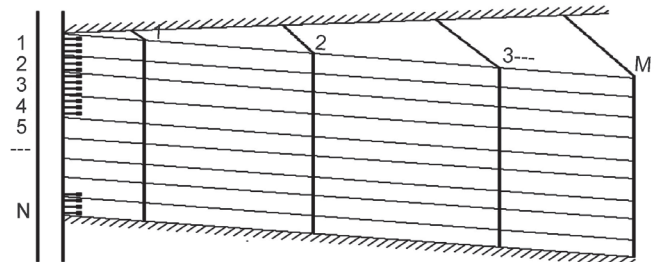


Рис. 1. Схема конечно-разностной сетки имитационной модели пласта.

Областью решения является вертикальное сечение пласта в предположении о справедливости радиальной фильтрации флюидов в реальной залежи. Область решения аппроксимируется конечно-разностной сеткой размером $N \times M$, для каждого узла которой записывается два конечно-разностных уравнения, аппроксимирующих систему (2). Метод решения системы (2), выбранный нами для данной модели ввиду сложности моделируемой ситуации: закачка газа под контакт газ-вода, существенное различие в плот-

ностях и вязкостях флюидов, обуславливающее большую скорость всплытия газа – метод совместного решения уравнений (известный как SS-метод) – неявный по давлению и неявный по насыщенности.

В качестве граничных условий принимаются следующие:

– по скважине: $q_g = 2\pi \frac{K_L K_z}{\mu_z(P)} r \frac{dP}{dz}$ –

заданный расход газа (и воды);

– на внешней границе пласта; постоянное давление, равное гидростатическому; кровля и подошва пласта приняты непроницаемыми.

Для расчетов Инчукалнского подземного хранилища газа (ПХГ) была смоделирована область радиуса $R_k = 2000$ м с абсолютной отметкой кровли в выделенном контуре минус 810 м и постоянным контурным давлением на кровле 7,85 МПа. Вся моделируемая область была разбита сеткой размерами 15×15 узлов. Шаги по вертикали составили: 10 шагов по 4,7 м; два шага по 3 м; 3 шага по 4,7 м, с радиальной проводимостью 10×2500 мД, 2×10 мД и 3×1500 мД соответственно. Коэффициент анизотропии (отношение вертикальной проницаемости к горизонтальной) был принят равным 0,1.

Как видно из дискретизации по вертикали, был смоделирован пласт, состоящий из верхней (общая толщина 47 м) и нижней (15 м) хорошо проницаемых частей с проницаемостью 2,5 и 1,5 Д, разделенных слабопроницаемой (10 мД) перемычкой толщиной 6 м. Пористость по пласту была принятой 0,23. В слабопроницаемой перемычке пористость 0,1. Кровля пласта принималась осредненной по нескольким направлениям Инчукалнского ПХГ.

В качестве начального распределения газонасыщенности выбиралось такое, чтобы выполнялось условие капиллярно-гравитационного равновесия при минимальной (в конце периода отбора) газонасыщенной эффективной толщине 14 м (при газонасыщенности 40 %), что соответствует примерно 20 м общей мощности.

На описанной модели была смоделирована закачка газа в скважины, расположенные в:

- верхней части, интервал перфорации (-660 – -670);
- средней части, интервал перфорации (-670 – -680);
- нижней части, интервал перфорации (-717 – -732).

Были рассмотрены варианты, указанные в таблице.

Эффективность вариантов дифференцированной по разрезу закачки оценивалась по величине газонасыщенной области, формирующейся на 150-е сутки после начала закачки. На рисунке 2 показаны контуры газонасыщенной области, формирующейся при проведении закачки по вариантам II и III.

Варианты	Дебит, тыс. м ³ /сут		
	Верх. скв.	Сред. скв.	Нижн. скв.
I	500	0	0
II	500	300	0
III	500	300	400
IV	500	0	400
V	800	0	0
VI	800	0	400
VII	800	0	400

Табл.

Проведенное имитационное моделирование для условий Инчукалнского ПХГ позволяет сделать следующие выводы:
– закачка в среднюю часть пласта при сформированном газонасыщенном объеме, граница которого ниже уровня ниж-

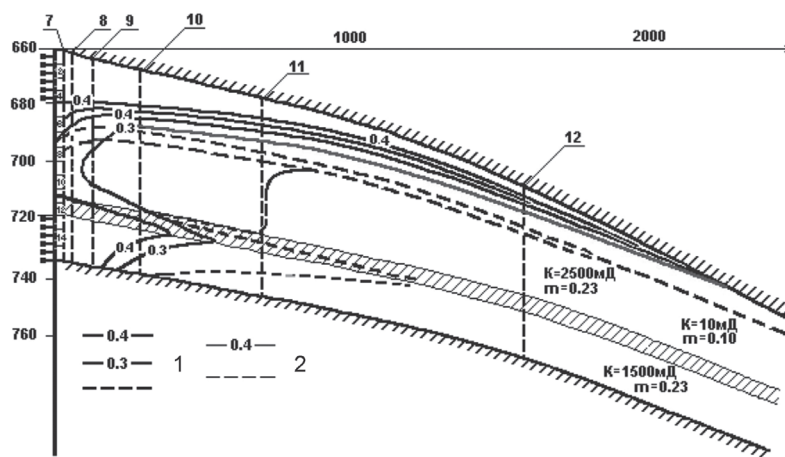


Рис. 2. Контуры газонасыщенной области, формирующиеся при закачке газа. 1 – Изоэнтальпии: 0,3 и граница газового пузыря при закачке в верхнюю, среднюю и нижнюю части, 2 – Изоэнтальпии: 0,4 и граница газового пузыря при закачке в верхнюю и среднюю части.

них дыр перфорации скважин средней части, малоэффективная, увеличение осушенной толщины в центральной части происходит в основном за счет увеличения объема закачанного газа в пласт;

– при закачке газа под слабопроницаемую перемычку в нижнем пропластке образуется самостоятельная газовая залежь, перепад давления между нижним пропластком и верхним в основном гасится глинистой перемычкой, поэтому от нее газ всплывает под воздействием только гравитационных сил, в верхнем пропластке образуется обширная зона (радиусом до 700 м в моделируемом случае) с насыщенностью газом 30 % и менее, но граница с газонасыщенностью 40 % ограничивает осушенную зону незначительно большую, чем с аналогичной насыщенностью при отсутствии закачки в нижний пропласток;

– разработанная имитационная модель адекватно моделирует процессы, протекающие в неоднородных водоносных пластах при подземном хранении газа, поэтому возможно ее применение для моделирования эксплуатации всего ПХГ с реальным расположением скважин и моделированием реальной неоднородности пласта для контролирования контура газонасыщенности и возможности утечки газа за пределы ловушки.

Очевидно, проведение работ по моделированию эксплуатации залежи с этой целью позволяет оперативно оценивать и вносить соответствующие коррективы в дифференцированную закачку газа и может применяться в условиях Инчукалнского ПХГ как дополнительный метод контроля за эксплуатацией газохранилища.

S.A. Khan, A.S. Garajshin, E. Birgers. Imitating model of a non-uniform layer as an additional research method of filling porous trap volume conditions.

This paper provides the results of simulation modeling of gas injection in heterogeneous deposit, in order to study the conditions of pore space filling while the gas is injected selectively across the cut. The model was made for Inchukalnskoe UGS and could be serve as an additional method of storage operation monitoring. Simulation modeling is aimed to provide real-time estimations and modifications of the differential gas injection.

Keywords: underground storage/storehouse of gas, imitating model, heterogeneity of a layer, a trap.