

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИОННОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Гайнетдинов Р.Р., Шамсиев М.Н.

Институт механики и машиностроения КНЦ РАН, г. Казань

Методы определения фильтрационных параметров пласта по кривым восстановления давления (КВД) широко используются на практике. Они основаны на изучении неустановившихся процессов перераспределения давления после пуска или остановки скважины. Скорость восстановления давления в скважине зависит от фильтрационных параметров пласта и газа.

При обработке КВД классическими методами возникают определенные трудности, например, довольно часто на КВД не удается выделить необходимый прямолинейный асимптотический участок, особенно для КВД, снятых с газовых скважин. Поэтому представляет практический интерес разработка численных методов оценки фильтрационных параметров, использующих всю кривую изменения давления в остановленной скважине, а не только ее асимптоту, и не требующих дифференцирования эмпирических кривых.

В данной работе предложен вычислительный алгоритм для определения коллекторских свойств пласта по КВД на основе теории регуляризации. Этот алгоритм позволяет сократить время промышленного эксперимента, а также учитывать приток газа после остановки эксплуатационной скважины.

Постановка и метод решения обратной задачи. Коэффициент проводимости $s = k/\mu$ определяется из минимизации функционала невязки [1, 2]

$$J(s) = \int_0^T (\phi(t)^2 - P(r_c, t)^2)^2 dt, \quad (1)$$

где $\phi(t)$ – наблюдаемые давления на скважине, $P(r_c, t)$ – решение краевой задачи [3, 4]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P^2}{\partial r} \right) = \frac{1}{\bar{\kappa}} \frac{\partial P^2}{\partial t}, \quad 0 < r < R_k, \quad 0 < t \leq T \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями

$$P^2(r, 0) = \theta^2(r), \quad (3)$$

$$P^2(R_k, t) = P_k^2, \quad (4)$$

$$\pi \frac{sh}{P_{am}} \frac{T_{cm}}{T_{nl}z} r_c \left. \frac{\partial P^2}{\partial r} \right|_{r=r_c} = Q(t), \quad (5)$$

k – проницаемость пласта, μ – вязкость газа, $\bar{\kappa} = sP_k / m_0$ – пьезопроводность, P_k – пластовое давление, $\theta(r)$ – начальное пластовое давление, m_0 – пористость, T_{nl} – пластовая температура, T_{cm} – стандартная температура, z – коэффициент сверхсжимаемости газа, R_k – радиус контура питания, r_c – радиус скважины, $Q(t)$ – дебит скважины, h – толщина пласта.

Задача минимизации (1) сводится к безусловной оптимизации при помощи функционала Лагранжа [1, 2, 5]. Из условия стационарности функционала Лагранжа следует, что градиент функционала имеет вид

$$\nabla J_s = - \int_0^T \nabla \Psi^2 \nabla m^2 dt, \quad (6)$$

где Ψ – решение сопряженной задачи

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi^2}{\partial r} \right) = - \frac{1}{\bar{\kappa}} \frac{\partial \Psi^2}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\Psi^2(r, T) = 0, \quad (8)$$

$$\Psi^2(R_k, t) = 0, \quad (9)$$

$$\pi \frac{sh}{P_{am}} \frac{T_{cm}}{T_{nl}z} r_c \left. \frac{\partial \Psi^2}{\partial r} \right|_{r=r_c} = 2(\varphi(t)^2 - P(r_c, t)^2). \quad (10)$$

Итерационный процесс для минимизации функционала (1) строится методом наискорейшего спуска.

Численные результаты. В табл. 1 приведены исходные данные по кривым восстановления давления, снятым с газовых скважин [3], где P_3^0 – забойное давление до остановки скважины, P_3^T – последнее измерение забойного давления, Q – дебит скважины до ее остановки, T_{nl} – пластовая температура, T_{cm} – стандартная температура, z – коэффициент сверхсжимаемости газа, T – время промыслового эксперимента, N – число измерений забойного давления после остановки скважины.

Таблица 1. Исходные данные.

№ КВД	P_3^0 МПа	P_3^T МПа	Q тыс.м ³ /сут	$T_{пл}$ К	$T_{ст}$ К	z	T сек	N
1	16.671	22.487	754	303	293	0.82	1285200	16
2	7.384	14.259	103	281	293	0.70	646200	34
3	17.366	22.998	1030	303	293	0.82	986400	17

Результаты обработки этих кривых предложенным и классическими методами [3] приведены в табл. 2. Во втором столбце – по предложенному методу, в третьем – по классическому.

Таблица 2. Результаты обработки КВД.

№ КВД	$\sigma = kh / \mu$ (мкм ² м/мПа)	σ^k (мкм ² м/мПа)
1	21.487	43.42
2	0.859	1.97
3	12.558	31.24

Таким образом, разработан численный алгоритм для оценки фильтрационных параметров газоносных пластов по кривым восстановления давления на основе метода итерационной регуляризации.

Литература

1. Хайруллин М.Х., Шамсиев М.Н., Садовников Р.В. Определение параметров пластов по кривой восстановления давления на основе теории регуляризации // Тр. Всероссийской науч. конф. "Фундаментальные проблемы нефти и газа". – Москва, 1996. – Т. 4. – С. 291–297.
2. Хайруллин М.Х., Шамсиев М.Н., Садовников Р.В. Численные алгоритмы решения обратных коэффициентных задач подземной гидромеханики // Математическое моделирование. – 1998. – Т. 10. – № 7. – С. 101–110.
3. Гриценко А.И., Алиев З.С., Ермилов О.М., Ремизов В.В., Зотов Г.А. Руководство по исследованию скважин. – М.: Наука, 1995. – 523 с.
4. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
5. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 286 с.