Г.Н. Курлаев

ГИДРОСТАТИКА ПРИТОКА К ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДВУЗАБОЙНОЙ СКВАЖИНЕ

Разработана модель притока к скважине, дренирующей два продуктивных горизонта. Доказано, что при выключении в забое скважины могут формироваться различные структуры перетоков между коллекторами.

Многозабойные скважины, добыча нефти, модель.

В современных публикациях по разработке месторождений активно обсуждаются вопросы «интеллектуализации» процессов нефтедобычи на основе средств оперативного контроля и управления и систем информационного сопровождения.

Целью нововведений является выбор наиболее эффективного варианта выработки месторождения [1, 4, 5]. Обзор зарубежных публикаций говорит о широком распространении таких технологий, причем дренирование нескольких горизонтов одной скважиной — скорее правило, чем исключение в практике добычи [4, 5]. Эксплуатация многозабойных скважин позволяет значительно быстрее и эффективнее добывать нефть, но требует существенного увеличения капитальных и эксплуатационных затрат, которые могут быть оправданны только при доказанных экономических выигрышах подобных нововведений [2, 3, 6].



Рис. 1. Схема двузабойной скважины

Задача данного исследования — найти взаимосвязь между параметрами двузабойной скважины и ее установившейся реакцией (выражаемой в q_1, q_2 — потоках 1 и 2-го горизонтов) на возмущающее воздействие — отбор жидкости. Отбор жидкости, в свою очередь, регулирует давление в первом (рис. 1) забое

(p_{Z1}). Далее эту зависимость будем называть статической характеристикой системы и обозначать $q_i(p_{Z1})$. Возмущающее воздействие p_{Z1} будем изменять от режима нормальной добычи ($p_{Z1} = 6$ МПа) до полного останова скважины. Статическая характеристика имеет ломаный вид, что дает определенные выгоды при решении задачи идентификации параметров подобных систем [7].

Объект исследования схематически изображен на рис. 1, где обозначены параметры G_i — удельный вес жидкости в *i*-м пласте, P_{Ki} — среднепластовое давление *i*-го пласта, w_i — гидропроводность *i*-го пласта, переменные γ_1 удельный вес добываемой жидкости, γ_2 — удельный вес жидкости между 1 и 2-й областями перфорации, q — суммарный поток, p_{Z2} — давление 2-го забоя и регулируемая величина p_{Z1} — давление 1-го забоя.

Нормальному режиму эксплуатации соответствует добыча из двух коллекторов ($q = q_1 + q_2$). Запишем уравнения притоков (1) [8] и уравнения удельных весов добываемой жидкости (2):

$$\begin{cases} q = q_1 + q_2 \\ q_1 = w_1(P_{K1} - p_{Z1}) \\ q_2 = w_2(P_{K2} - p_{Z1} - \Delta h \cdot \gamma_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{q_1 G_1 + q_2 G_2}{q_1 + q_2} \\ \gamma_2 = G_2 \end{cases}$$
(2)

С уменьшением отбора возможны межпластвые перетоки, обусловливающие нелинейность статической характеристики системы. Перетоки можно разделить на два типа: из первого пласта во второй (AC) и наоборот (AB):



Рис. 2. Типы межпластовых перетоков

Стоит заметить, что нелинейность возникает, только если имеет место замена (или изменение качества) жидкости в интервале Δh . Нетрудно догадаться, что если $q_2 > 0$ во всем интервале значений $p_{Z1} = \arg\{q > 0\}^{**}$, замены не происходит, $\gamma_2 = G_2$ (безусловно) и графики получатся линейными:

^{*)} Формулы притоков остаются неизменными и далее записываться не будут.

 $^{^{**)}}$ То есть таких p_{Z1} , что q > 0 .



Рис. 3. Статическая характеристика $q_i(p_{Z1})$ при $P_{K2} > P_{K1}$. Переток соответствует отбору q < 20

Таким образом, нелинейности могут возникнуть при $q_2 < 0$, или $w_2(P_{K2} - p_{Z1} - \Delta h \cdot \gamma_2) < 0$, откуда

$$p_{Z1} > P_{K2} - \Delta h \cdot \gamma_2. \tag{3}$$

Так как $P_{K1} > p_{Z1}$, то $P_{K1} > P_{K2} - \Delta h \cdot \gamma_2$. Дальнейшие рассуждения покажут, что это условие эквивалентно $P_{K1} > P_{K2} - \Delta h \cdot \max(G_1, G_2)$. То есть при таком соотношении давлений возможны нелинейности. Разобьем это неравенство на два:

$$P_{K1} > P_{K2} - \Delta h \cdot \max(G_1, G_2),$$
 (4)

$$P_{K2} - \Delta h \cdot \min(G_1, G_2) > P_{K1} > P_{K2} - \Delta h \cdot \max(G_1, G_2).$$
(5)

Нетрудно видеть, что первое неравенство означает $q_1 > q_2^{*}$ (ситуация AC). А второе? Как будут направлены перетоки при отсутствии различия подпоров пластов (и при q = 0)? Если $G_1 < G_2$, то перетоков не будет, так как система имеет положение устойчивого равновесия столбов жидкостей G_2 и G_1 (рис. 4). Вес γ_2 заменится эквивалентным весом, соответствующим ус-

тойчивому равновесию $\gamma_{2VP} = rac{\gamma_2 \cdot h_2 + \gamma_1 \cdot h_1}{h_2 + h_1}$, при этом

^{*)} При малых дебитах. При больших прямые q_1 и q_2 могут пересекаться за счет разностей w_1 и w_2 . На дальнейшие выводы это никак не влияет.



Рис. 4. Положение устойчивого равновесия столбов жидкостей

Учитывая (6), можно записать систему уравнений для этого случая:

$$\begin{cases} \gamma_{1} = \frac{q_{1}G_{1} + q_{2}G_{2}}{q_{1} + q_{2}}, _ecnu_q_{2} > 0\\ \gamma_{2} = G_{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = \frac{P_{K2} - p_{Z1}}{\Delta h}, _ecnu_q_{2} = 0 \end{cases}$$
(7)

Сравнивая условия из (7) с (3) и учитывая, что здесь $\gamma_2=G_2$, получим

$$\begin{cases} \gamma_{1} = \frac{q_{1}G_{1} + q_{2}G_{2}}{q_{1} + q_{2}}, _ec.nu_p_{Z1} < P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2} \\ \gamma_{2} = G_{2} \\ \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = G_{1}, _ec.nu_p_{Z1} > P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2} \end{cases}$$
(8)

Каждой точке горизонтальной части графика (рис. 5) соответствует свой уровень h_2 (на рис. 4).



Рис. 5. $q_i(p_{Z1})$, соответствующая неравенствам (5) и $G_1 < G_2$

Если $G_1 < G_2$, равновесие неустойчивое, отклонение качества γ_2 от $\gamma_{2\rm YP}$ в сторону увеличения (что имеет место при добыче, когда $\gamma_2 = G_2$) приводит к перетоку типа AB с линейной характеристикой и описывается системой уравнений (1, 2).

Теперь рассмотрим неравенство (4) при $G_1 < G_2$. При равенстве $p_{Z1} = P_{K2} - \Delta h \cdot G_2$, согласно (1, 2), блокируется приток из второго горизонта $q_2 = 0$. При малом повышении давления p_{Z1} происходит самопроизвольное выдавливание (замещение) флюида из интервала Δh с весом γ_2 на более тяжелый γ_1 из верхнего горизонта, что активизирует обратный ток второго горизонта. График статической характеристики второго горизонта $q_2(p_{Z1})$ с ростом p_{Z1} переходит на параллельную линию, смещенную вниз: $q_2 = w_2(P_{K2} - p_{Z1} - \Delta h \cdot G_1)$ (ср. с (1, 2)). Условия переключения запишутся как

$$\begin{cases} \gamma_{1} = \frac{q_{1}G_{1} + q_{2}G_{2}}{q_{1} + q_{2}}, _ecnu_p_{Z1} < P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2} \\ \gamma_{2} = G_{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = G_{1}, _ecnu_p_{Z1} > P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2} \end{cases}$$
(9)

При возвратном уменьшении p_{Z1} обратный ток $q_2 < 0$ вновь обращается в ноль при $p_{Z1} = P_{K2} - \Delta h \cdot G_1$. Последующее малое понижение давления приводит к выталкиванию тяжелого флюида γ_1 из интервала Δh более легким γ_2 , что тут же переводит $q_2(p_{Z1})$ обратно на верхнюю линию:

$$\begin{cases} \gamma_{1} = \frac{q_{1}G_{1} + q_{2}G_{2}}{q_{1} + q_{2}}, _ecnu_p_{Z1} < P_{K2} - \Delta h \cdot G_{1} \\ \gamma_{2} = G_{2} \\ \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = G_{1}, _ecnu_p_{Z1} > P_{K2} - \Delta h \cdot G_{1} \end{cases}$$
(10)

Таким образом, характеристика напоминает петлю гистерезиса:



Рис. 6. $q_i(p_{Z1})$, соответствующая неравенствам (5) и $G_1 > G_2$

Если же $G_1 > G_2$, то характеристика будет иметь участок устойчивого равновесия при $q_2 = 0$, или (ср. с (6)) $p_{Z1} = P_{K2} - \Delta h \cdot \gamma_2$. γ_2 при этом, очевидно, изменяется от G_2 до G_1 . Отсюда уравнения для этого случая:

$$\begin{cases} \gamma_{1} = \frac{q_{1}G_{1} + q_{2}G_{2}}{q_{1} + q_{2}}, _ecnu_p_{Z1} < P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2} \\ \gamma_{2} = G_{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = \frac{P_{K2} - p_{Z1}}{\Delta h}, _ecnu_p_{Z1} \in (P_{K2} - \Delta h \cdot G_{2}; _P_{K2} - \Delta h \cdot G_{1}) \\ \gamma_{1} = G_{1} \\ \gamma_{2} = G_{1}, _ecnu_p_{Z1} > P_{K2} - \Delta h \cdot G_{1} \end{cases}$$
(11)

и график:



Рис. 7. $q_i(p_{Z1})$, соответствующая неравенствам (4) и $G_1 > G_2$

Полученные типы перетоков сведены в табл. Результаты данного исследования служат основой для построения динамической модели, которая, в свою очередь, будет использоваться в решении задачи идентификации параметров притоков к скважине, дренирующей два горизонта.

$G_2 > G_1$			$G_2 < G_1$
$P_{_{K2}} < P_{_{K1}} + \Delta h \cdot G_{_1}$	$\begin{cases} P_{K2} > P_{K1} + \Delta h \cdot G_1 \\ P_{K2} > P_{K1} + A h \cdot G_1 \end{cases}$	$P_{K2} > P_{K1} + P_{K2} > $	$P_{K1} + P_{K2} < P_{K1} + \Delta h \cdot G_1$
	$\left(P_{K2} < P_{K1} + \Delta h \cdot G_2\right)$	$+\Delta n \cdot G_2$ $+\Delta n \cdot$	
	(A) (B) (B)		
$\begin{array}{c} q_1, q_{1, \mathbf{y}^1, \mathbf{y}^2, \mathbf{y}^1} \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_6 $	9, 9, 4' crr 10 	q1, q2, ut/ corr 60 a0 a0 a0 a1 a2 a3 a3 a4 a5 a6 a7 a6 a7 a7 a8 a9 a9 a1 a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 a9	$\begin{array}{c} q_{1}q_{1,k}^{2} \operatorname{crr} \\ q_{2} \\ q_{3} \\ q_{4} \\ q_{1,k}^{2} \operatorname{crr} \\ q_{2} \\ q_{3} \\ q_{4} \\ q_{5} \\ $

Типы межпластовых перетоков

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахмадеев Р.Р. Интеллектуализация скважин с применением УЭЦН с КПВД // Инженер. практика. 2011. № 3. С. 86–87.

2. Афанасьев В.А. Проблемы и перспективы внедрения технологии ОРР многопластовых месторождений в России // Инженер. практика. 2011. № 3. С. 72–75.

3. Лысенко В.Д. Сравнение перспективных способов разработки нефтяных пластов // Нефтепромысл. дело. 2008. № 9. С. 4–10. 4. *Naus M. M. J. J., Dolle N., Jansen J.-D.* Optimization of Commingled Production Using Infinitely Variable Inflow Control Valves // SPE 10.2118/90959-PA.

5. Arashi Ajayi, Konopczynski M. Simulation of Intelligent Well Completion Predicts Oil Recovery Increase in a Commingled Production Scenario: A Case Study // SPE 10.2118/85677-MS.

6. Соловьев И.Г. Контроль и управление гидродинамикой скважинной системы в нестационарных средах // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2011. № 10. С. 55–63.

7. Соловьев И.Г., Ковтуненко С.И. Идентификация параметров притоков двузабойной скважины. Модели равновесных состояний // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 1. С. 19–24.

8. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исследований, 2005. 496 с.

G.N. Kurlayev

HYDROSTATICS OF INFLUX TO A VERTICAL DOUBLE BRANCH WELL

Subject to development being a model of influx to an oil well draining two productive strata. It is proved that under shutting off, different structures of overflow could be formed between reservoirs in the well bottom.

Multibranch wells, oil production, model.