

## К ВОПРОСУ ПРИТОКА НЕФТИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ НЕСОВЕРШЕННУЮ СКВАЖИНУ

Л. А. ПУХЛЯКОВ, М. В. САМОЙЛОВА

(Представлена проф. А. В. Аксариним)

При определении притока нефти в скважину обычно пользуются формулой Дюпюи

$$Q = \frac{2\pi kh(P_0 - P_3)}{\mu \ln \frac{R}{r}}, \quad (1)$$

где  $Q$  — приток в  $t/сут.$ ,  $P_0$  и  $P_3$  — давления пластовое и забойное в  $атм.$ ,  $\mu$  — вязкость пластовой жидкости в пуазах,  $k$  — проницаемость пласта в дарси,  $h$  — мощность пласта в метрах,  $R$  — радиус влияния скважины в метрах,  $r$  — радиус скважины в метрах. Формула эта справедлива в отношении гидродинамически совершенных скважин, т. е. таких скважин, которые прошли пласт от кровли до подошвы и в зоне пласта не обсажены колоннами. Между тем известно, что обычно скважины бывают гидродинамически несовершенными, и несовершенство их заключается прежде всего в том, что они обсаживаются металлическими колоннами, так что приток нефти в них осуществляется лишь через специально проделанные отверстия, удаленные друг от друга иногда на значительные расстояния.

Для определения притока в такого рода скважину допустим, что некоторая скважина радиусом  $r_0$  вошла в пласт мощностью  $h$  и остановилась в самой кровле его (рис. 1, а). Допустим далее, что пласт является достаточно прочным и потому добыча нефти из нее ведется при открытом забое. Выделим вокруг забоя этой скважины полусферу радиуса  $r_1$  и внутри нее сфероидальный слой радиуса  $\rho$  толщиной  $d\rho$ , описанный вокруг того же центра (рис. 1, а). Очевидно, при постоянном притоке в эту скважину перепад давлений на границах этого слоя выразится соотношением

$$dP = \frac{Q\mu}{2\pi\rho^2k} d\rho, \quad (2)$$

откуда перепад давлений на границах всей полусферы выразится через интеграл от этого выражения

$$\int_{P_2}^{P_1} dP = \frac{Q\mu}{2\pi k} \int_{r_0}^{r_1} \frac{d\rho}{\rho^2},$$

$$P_1 - P_2 = \frac{Q\mu}{2\pi k} \cdot \frac{1}{r} \Big|_{\rho_0}^{\rho_1},$$

$$P_1 - P_2 = \frac{Q\mu}{2\pi k} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right) = \frac{Q\mu}{2\pi k} \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0 \cdot \rho_1}. \quad (3)$$

Если же для исследования мы выбрали бы такую же скважину, но пройденную до середины пласта, и у забоя ее создали бы небольшую каверну примерно шарообразной формы радиуса  $\rho_0$  (рис. 1, б), то,

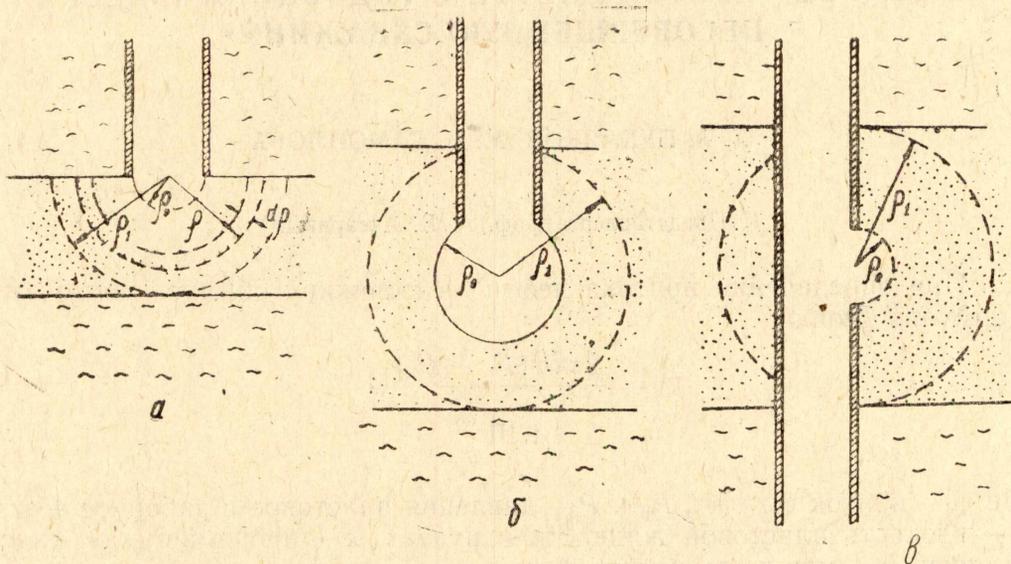


Рис. 1. Различные типы гидродинамически несовершенных скважин: а — скважина вскрыла кровлю пласта; б — скважина достигла каверны, находящейся в середине пласта; в — скважина эксплуатирует пласт через одно отверстие, находящееся в его середине. Объяснения к рисунку: волнистыми линиями заштрихованы глины; точками — песчаники;  $\rho_0$  — радиус отверстия, через которое нефть поступает в скважину;  $\rho_1$  — радиус влияния этого отверстия, то есть радиус пространства, в котором перепад давлений может быть выражен формулой (5).

проведя расчет аналогичным образом, мы получили бы следующее выражение перепада давлений в сфере

$$P_1 - P_2 = \frac{Q\mu}{4\pi k} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0 \cdot \rho_1}. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что выражение (3) отличается от выражения (4) лишь тем, что в знаменателе первого из них стоит коэффициент «2», а в знаменателе второго — коэффициент «4». Если для исследования взять скважину, обсаженную колонной, в которой пробито только одно отверстие, приходящееся как раз на середину пласта, то, выделив вокруг него сферу (рис. 1, в), получим на ней перепад давлений, который будет выражаться соотношением

$$P_1 - P_2 = \frac{Q\mu}{2\varphi\pi k} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0 \cdot \rho_1}, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  — радиус отверстия,  $\rho_1$  — радиус влияния отверстия,  $\varphi$  — коэффициент, величина которого лежит в пределах

$$1 < \varphi < 2.$$

Приближенно этот коэффициент можно определить по формуле

$$\varphi = 1 + \frac{\rho_1}{\rho_1 + 2r}, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус скважины.

За пределами радиуса влияния отверстия перепад давлений должен выражаться формулой Дюпюи, которая в данном случае примет вид

$$P_0 - P_1 = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R}{\rho_1 + r}, \quad (7)$$

где  $P_0$  давление за пределами радиуса влияния скважины,  $R$  — радиус влияния скважины. В итоге общая величина перепада давлений выразится соотношением

$$P_0 - P_2 = \frac{Q\mu}{2\pi k} \left( \frac{\rho_1 - \rho_0}{\varphi \rho_0 \rho_1} + \frac{1}{h} \ln \frac{R}{\rho_1 + r} \right). \quad (8)$$

Проанализируем полученное выражение при больших значениях радиуса влияния отверстий. Допустим, что некоторая скважина прошла пласт мощностью 4 м, обсажена 6-дюймовой обсадной колонной (т. е. имеет радиус 7,5 см) и проперфорирована с плотностью 3 отверстия на метр. Таким образом, число отверстий в ней равно 12 и мощность пласта, приходящаяся на одно отверстие,  $h' = 33,3$  см. Допустим далее, что радиус отверстий оказался равным 0,5 см и что при перепаде давлений 30 атмосфер получен приток 6 т/сут. Требуется установить, каким будет перепад давлений при том же притоке, если число отверстий в колонне удвоить и если радиус влияния скважины при этом был и останется равным 100 м (10000 см).

Очевидно, количество жидкости, поступающей в рассматриваемую скважину через каждое отверстие, должно быть равно 0,5 т/сут. Далее, поверхность одного метра обсадной колонны определится соотношением

$$F = \pi \cdot 15,0 \cdot 100 = 4712 \text{ см}^2,$$

отсюда площадь, приходящаяся на каждое отверстие ее, будет равна 1571 см<sup>2</sup>, среднее расстояние между отверстиями 39,64 см и радиус влияния каждого отверстия, равный половине этого расстояния — 19,8 см. Подставляя полученное значение  $\rho_1$ , а также величину радиуса колонны  $r = 7,5$  см в формулу (6), находим, что коэффициент  $\varphi$  в рассматриваемом случае будет равен 1,569. Наконец, подставляя все эти величины в формулу (8), получаем

$$P_0 - P_2 = \frac{0,5\mu}{2\pi k} \left( \frac{19,8 - 0,5}{1,569 \cdot 0,5 \cdot 19,8} + \frac{1}{33,3} \ln \frac{10000}{19,8 + 7,5} \right),$$

$$30 = \frac{0,5\mu}{2\pi k} (1,2425 + 0,1771), \quad (9)$$

откуда находим, что содержащиеся в выражении (9) постоянные дадут

$$\frac{\mu}{2\pi k} = 42,265.$$

Если число отверстий в рассматриваемой колонне удвоить, то средний приток на одно отверстие (при постоянном притоке в скважину в целом) уменьшится до 0,25 т/сут., среднее расстояние между отверстиями — до 28 см, радиус влияния отверстия — до 14 см, мощность

пласта на одно отверстие — до 16,67 см, и величина  $\phi$  должна будет достигь 1,4827. Подставляя эти данные в формулу (8), получаем

$$P_0 - P_2 = 0,25 \cdot 42,265 (1,3007 + 0,3685), \quad (10)$$

откуда находим, что перепад давлений в этом случае должен достигать 17,637 атм.

Итак, увеличивая плотность перфорации с 3 до 6 отверстий на метр, мы можем получить тот же приток при перепаде давлений в 1,7 раза меньшем исходного. Если же при этом перепад давлений будет доведен до прежней величины, то мы получим увеличение притока в 1,7 раза больше исходного. Здесь, однако, следует отметить, что при дальнейшем увеличении плотности перфорации эффект уменьшения перепада давлений или увеличения притока при том же перепаде будет уже менее значительным. Так, если рассматриваемая скважина будет проперфорирована с плотностью 50 отверстий на метр, то мы получаем

$$P_0 - P_2 = 0,03 \cdot 42,265 (1,4416 + 3,3482) = 6,073 \text{ атм}, \quad (11)$$

а если она будет проперфорирована с плотностью 100 отверстий на метр, то получаем

$$P_0 - P_2 = 0,015 \cdot 42,265 (1,4212 + 6,8188) = 5,224 \text{ атм}. \quad (12)$$

Таким образом, в этом случае перепад давлений уменьшается только в 1,16 раза. Если же число отверстий будет увеличено еще в два раза и доведено до 200 отверстий на метр, то получаем

$$P_0 - P_2 = 0,0075 \cdot 42,265 (1,393 + 13,831) = 4,826 \text{ атм}, \quad (13)$$

что соответствует уменьшению перепада давлений только в 1,09 раза. Наконец, если эту скважину рассматривать как гидродинамически совершенную, т. е. если пренебречь сопротивлением обсадной колонны, то первый член в скобках выражения (8) обращается в нуль и все выражение примет вид

$$P_0 - P_2 = 6,0 \cdot 42,265 \left( 0 + \frac{1}{400} \ln \frac{10\,000}{7,5} \right) = 4,526 \text{ атм}. \quad (14)$$

Из сказанного следует один важный практический вывод. А именно, при значительных расстояниях между отверстиями в обсадной колонне приток в скважину можно увеличить путем дополнительной перфорации, т. е. увеличением числа отверстий в колонне, однако делать это количество слишком большим не следует, так как при большой плотности перфорации увеличение числа отверстий на приток влияет мало, а прочность колонны уменьшается в значительной мере. По-видимому, доводить число отверстий более чем до 50 на метр не следует.