

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ НЕФТИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ НАГРЕВЕ

Хайдар А.М.

*Башкирский государственный университет*

*Приведены результаты теоретических исследований возможности использования мощного высокочастотного (ВЧ) электромагнитного (ЭМ) излучения на месторождениях вязкопластичных нефтей с целью интенсификации добычи нефти. Разработана двумерная математическая модель процесса добычи нефти горизонтальными скважинами при одновременном ВЧ ЭМ воздействии. Показано, что ВЧ ЭМ нагрев пласта существенно влияет на расширение границы зоны фильтрации при большом начальном градиенте сдвига нефти. Влияние на расход добываемой нефти менее значительно, но с течением времени растет.*

Промысловая практика показывает, что в пластах, насыщенных высоковязкими нефтями, зачастую отсутствует приток нефти из пласта, проявляются аномальные свойства нефтей, не характерные для ньютоновских жидкостей. Жидкости с такими аномальными свойствами называются неньютоновскими. Это жидкости, не следующие модели линейно-вязкой жидкости, для которой имеет место линейная изотропная связь между тензорами напряжений и скоростей деформации [1]. Такими жидкостями являются высоковязкие нефти, содержащие высокомолекулярные компоненты – парафины, асфальтены и смолы. Наличие у всех этих жидкостей аномальных свойств, отличающих их от ньютоновских, объясняется особенностями молекулярных структур и внутренних, молекулярных движений. Наиболее широкое распространение имеют «вязкопластичные» жидкости, в которых наряду с вязкостью проявляются пластические свойства, заключающиеся в наличии у жидкости некоторого предельного напряжения сдвига, только после достижения которого жидкость начинает течь. Описание фильтрации вязкопластической жидкости в пористой среде было предложено А.Х. Мирзаджанзаде в виде обобщения закона Дарси с введением предельного градиента сдвига [2].

Отсутствие фильтрации особенно характерно для малопроницаемых пластов, содержащих высоковязкие нефти с предельным градиентом сдвига. Одним из перспективных способов воздействия на пласт с целью вызова притока флюи-

да, интенсификации его добычи, может быть нагрев пласта электромагнитным (ЭМ) излучением. Высокочастотный (ВЧ) ЭМ нагрев пласта с ньютоновской нефтью рассматривался в работе [3]. В данной работе также предлагается математическое моделирование ВЧ ЭМ нагрева призабойной зоны горизонтальных нефтяных скважин, но уже с неньютоновской нефтью.

Для расчетных исследований принята цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$  с осевой симметрией: ось  $z$  направлена вдоль оси горизонтальной скважины. Электрический ток вдоль левого и правого плеч излучателя распределяется по закону:

$$I_z = \begin{cases} I_0 \cdot \exp(jkz) & \text{при } Z_3 < z < 0 \\ I_0 \cdot \exp(-jkz) & \text{при } 0 < z < Z_4 \end{cases}.$$

Для вязкопластичной жидкости уравнение пьезопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_l}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{\mu(T)} \left[ \frac{\partial P}{\partial r} - G \right] \right) + k_b \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\mu(T)} \left( \frac{\partial P}{\partial z} - G \right) \right]; \quad k_l = \frac{k_b}{m\beta_f + \beta_0}, \quad (1)$$

где  $k_l$  – коэффициент пьезопроводности;  $G$  – начальный градиент сдвига нефти;  $m$  – пористость среды;  $\beta_f$  и  $\beta_0$  – сжимаемость нефти и скелета породы пласта;  $k_b$  и  $\mu(T)$  – проницаемость пористой среды и динамическая вязкость нефти, зависящая температуры по закону:

$$\mu(T) = \mu_0 \exp(-\gamma(T - T_0)), \quad (2)$$

$\gamma$  – температурный коэффициент,  $T_0$ ,  $T$  – начальная и текущая температура соответственно,  $\mu_0$  – вязкость нефти при температуре  $T_0$ .

Уравнение теплопроводности имеет обычный вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a_b}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a_b \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{v_r c_f \rho_f}{\alpha_b} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{v_z c_f \rho_f}{\alpha_b} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{q}{\alpha_b}. \quad (3)$$

Здесь  $a_b$  и  $\alpha_b$  – коэффициент температуропроводности и объёмная теплоёмкость пород нефтяного пласта;  $c_f$ ,  $\rho_f$  – удельная теплоёмкость и плотность нефти;  $q$  – плотность распределенных источников тепла [3]:

$$q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta [(\operatorname{Re} E_r)^2 + (\operatorname{Re} E_z)^2 + (\operatorname{Im} E_r)^2 + (\operatorname{Im} E_z)^2], \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая,  $f$  – циклическая частота колебаний ЭМ поля;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon'$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  – относительная диэлектрическая проницаемость и тан-

генс угла диэлектрических потерь среды;  $Re, Im$  – действительная и мнимая части напряженности электрической составляющих ЭМ поля  $E_z, E_r$ , параллельной и перпендикулярной оси излучателя ЭМ волн:

$$E_z = \frac{I_0 k}{\omega \epsilon 4 \pi} \left[ \frac{1}{R_3} \exp(-jk(R_3 - Z_3)) + \frac{1}{R_4} \exp(-jk(R_4 + Z_4)) - \frac{2}{R} \exp(-jkR) \right]; \quad (5)$$

$$E_r = \frac{I_0 k}{\omega \epsilon 4 \pi r} \left[ \frac{2z}{R} \exp(-jkR) - \frac{(z - Z_3)}{R_3} \exp(-jk(R_3 - Z_3)) - \frac{(z - Z_4)}{R_4} \exp(-jk(R_4 + Z_4)) \right]; \quad (6)$$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}; \quad R_3 = \sqrt{r^2 + (z + Z_3)^2}; \quad R_4 = \sqrt{r^2 + (z - Z_4)^2}.$$

Здесь  $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0 (1 - j \operatorname{tg} \delta)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость среды;  $k = \beta - j\alpha$  – коэффициент распространения ЭМ волн;  $\beta, \alpha$  – коэффициенты фазы и затухания ЭМ волн.

Как и в работе [3], исследуется распространение ЭМ волн в пласте большой толщины, так что отражением ЭМ волн от внешних границ пласта пренебрегается, и в электродинамическом отношении нефтяной пласт считается неограниченной средой. Т.о., рассматриваемая система представляет собой симметричный вибратор ЭМ волн, плечами которого являются выступающая часть насосно-компрессорной трубы (НКТ) и внешняя поверхность обсадной колонны. Ввиду значительной длины плеч и большой поглощающей способности окружающей среды полагается, что ЭМ волны распространяются практически без отражения от концов плеч, т.е. являются бегущими. Зона поглощения средой энергии ЭМ волн определяется выражением  $Z = 1/\alpha$ . Схема возбуждения симметричного вибратора (излучателя ЭМ волн) и распределения электрического тока показана на рис. 1. Распределение напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМ поля ищется в некоторой точке пространства  $M$ ;  $R, R_3, R_4$  – расстояния от точки наблюдения  $M$  до точки возбуждения излучателя и границ зоны поглощения ЭМ волн  $Z_3 = -1/\alpha$  и  $Z_4 = 1/\alpha$ , соответственно.

В данном случае точкой возбуждения вибратора является точка начала горизонтальной части скважины. При решении термогидродинамической задачи полагается, что излучающая горизонтальная часть скважины совпадает с серединой пласта по горизонтали и вертикали, имеет координаты  $Z_2 = 200$  м и  $Z_5 = 500$  м. Продуктивный пласт представляет собой горизонтальный цилиндр радиуса  $r_m =$

45 м и длиной  $L=700$  м. Пласт простирается от точки с координатой  $Z_1=0$  до точки  $Z_6=700$  м (для удобства проведения вычислений начало цилиндрической системы координат смещено к левому краю пласта).

Перепад давления и понижение вязкости нефти вследствие ВЧ нагрева приводит к фильтрации нефти к забою скважины и отбору ее на поверхность земли. Уравнение фильтрации имеет вид обобщенного закона Дарси:

$$v_r = \begin{cases} -\frac{k_b}{\mu(T)} \left( \frac{\partial P}{\partial r} - G \right), & \frac{\partial P}{\partial r} > G \\ 0, & \frac{\partial P}{\partial r} \leq G \end{cases}; \quad (7)$$

$$v_z = \begin{cases} -\frac{k_b}{\mu(T)} \left( \frac{\partial P}{\partial z} - G \right), & \frac{\partial P}{\partial z} > G \\ 0, & \frac{\partial P}{\partial z} \leq G \end{cases}. \quad (8)$$

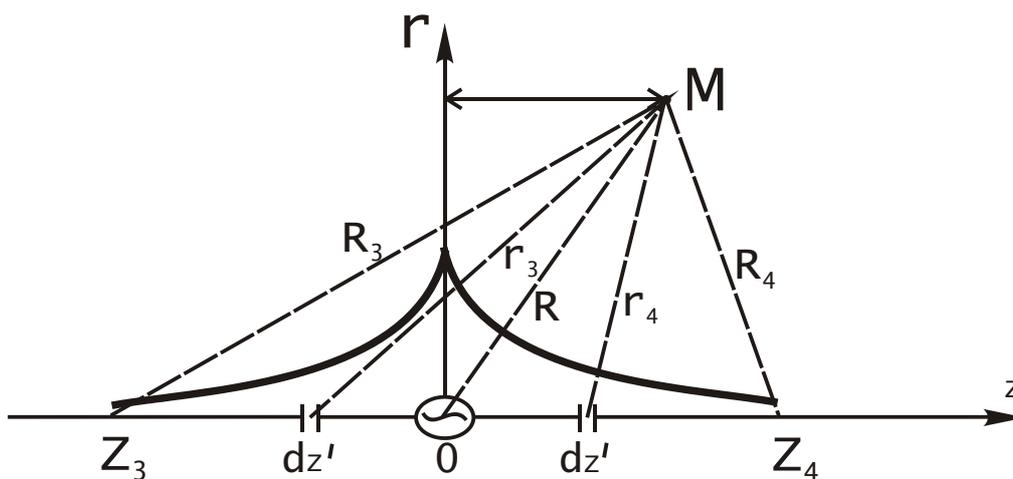


Рисунок 1. Схема возбуждения симметричного вибратора

В силу того, что жидкость обладает градиентом сдвига, в пласте образуются две зоны: зона фильтрации и застойная зона. Граница между ними перемещается со временем от скважины к границе пласта. Предполагается, что зона отсутствия фильтрации представляет собой невозмущенную область, в которой давление остается первоначальным. На границе между зонами соблюдаются граничные условия:

$$P(R(t), z, t) = P_0; \quad P(r, Z(t), t) = P_0 \quad (9)$$

Остальные краевые условия приняты в виде:

$$T(r, z, t=0)=T_0; \quad P(r, z, t=0)=P_0; \quad (10)$$

$$-\lambda_b \frac{\partial T(r_0, z, t)}{\partial r} \Big|_{r_0 \rightarrow 0} = 0; \quad T(r_m, z, t) = T_0; \quad (11)$$

$$T(r, 0, t) = T_0; \quad T(r, Z_6, t) = T_0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P(r_0, Z_1 \leq z \leq Z_2, t)}{\partial r} \Big|_{r_0 \rightarrow 0} = 0; \quad \frac{\partial P(r_0, Z_5 \leq z \leq Z_6, t)}{\partial r} \Big|_{r_0 \rightarrow 0} = 0; \quad (13)$$

$$P(r_0, Z_2 \leq z \leq Z_5, t) = P_b; \quad \frac{\partial P(r_m, z, t)}{\partial r} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial P(r, Z_1, t)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial P(r, Z_6, t)}{\partial r} = 0, \quad (15)$$

где  $r_0$ ,  $P_0$ ,  $\lambda_b$  – радиус скважины, первоначальное пластовое давление, теплопроводность пласта.

Забойное давление вдоль горизонтального ствола скважины  $P_b$  принимается постоянным. Дебит добываемой нефти  $Q(z)$  на участках пласта  $\Delta z$  можно определить исходя из обобщенного закона Дарси для радиальной составляющей скорости фильтрации (выражение (7)). Для этого следует проинтегрировать выражение (7) по всему объему подвижной нефти:

$$\int_{r_0}^{R_z} Q(z) dr = \frac{k}{\mu} 2\pi r \Delta z \left[ \int_{P_b}^{P_0} dP - \int_{r_0}^{R_z} G dr \right] \quad \text{или} \quad \int_{r_0}^{R_z} \frac{Q(z) \mu}{r} dr = k 2\pi \Delta z \left[ \int_{P_b}^{P_0} dP - \int_{r_0}^{R_z} G dr \right],$$

где  $R_z$  – граница раздела между зонами фильтрации и застоя на участке пласта  $\Delta z$  к данному моменту времени.

Произведя интегрирование в правой части уравнения, имеем:

$$Q(z) = \frac{k 2\pi \Delta z [(P_0 - P_b) - G(R_z - r_0)]}{\int_{r_0}^{R_z} \frac{\mu dr}{r}}. \quad (16)$$

Общий текущий дебит добываемого флюида  $Q_f$  определяется из выражения

$$Q_f = \int_{Z_2}^{Z_5} Q(z) dz. \quad (17)$$

Граница раздела между зонами фильтрации и застоя определяется по условию превышения градиента давления на границе над начальным градиентом сдвига нефти  $G$ .

Система уравнений (1), (3) с краевыми условиями (9) – (15) решалась методом конечных разностей по неявной схеме. При проведении расчетов были использованы следующие исходные параметры:  $N_0=20$  и  $60$  кВт;  $f=13,56$  МГц;  $P_0=10$  МПа;  $P_b=9$  МПа;  $T_0=15$  °С;  $L=300$  м;  $a_b=8,91 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $C_b=2969$  кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $c_f=2024$  Дж/(кг·К);  $\rho_f=918$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_0=0,2$  Па·с;  $\gamma=0,042$  К<sup>-1</sup>;  $r_0=0,04$  м;  $m=0,3$ ;  $k_b=0,5 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>;  $\varepsilon'=7,5$ ;  $tg \delta=0,05$ ;  $\alpha=0,0194$  м<sup>-1</sup>;  $\beta=0,778$  м<sup>-1</sup>;  $\beta_f=10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>;  $\beta_0=10^{-10}$  Па<sup>-1</sup>;  $G=2000, 5000$  и  $20000$  Па/м;  $Z_1=0$ ;  $Z_2=200$  м;  $Z_3=500$  м;  $Z_6=700$  м;  $r_m=45$  м.

Пространственные распределения температуры в пласте при ВЧ нагреве принципиально не отличаются от приведенных в работе [3]. По мере нагрева пласта температура во всех точках увеличивается. С увеличением расхода добываемой нефти температура уменьшается из-за притока из глубины пласта холодной нефти, но незначительно из-за объемности нагрева и небольших градиентов температуры. Принципиально отличаются распределения давления в пласте с ньютоновской и неньютоновской нефтью. Распределения давления сильно зависят от начального градиента сдвига нефти. На рис. 2 приведено распределение давления с начальным градиентом сдвига нефти  $G=2000$  Па/м в моменты времени  $t=10$  суток при ВЧ нагреве. Для удобства изображения призабойной зоны пласта, масштаб расстояний по координате  $z$  уменьшен в 10 раз. Из рисунка видно, что правая часть области фильтрации больше, чем левая. Это действие ВЧ нагрева пласта. Здесь расположена зона нагрева пласта.

На рис. 3 показано распределение температуры в тот же момент времени. Для удобства изображения призабойной зоны пласта масштаб расстояний по координате  $z$  уменьшен в 10 раз, а масштаб по координате  $r$  увеличен в 10 раз. Там, где температура выше, там и давление ниже.

ВЧ ЭМ нагрев пласта существенно влияет на расширение границы зоны фильтрации при большом начальном градиенте сдвига нефти. Влияние на расход добываемой нефти менее значительно, но с течением времени растет. Динамика движения границы зоны фильтрации  $R_f$  на забое скважины и изменения дебита скважины  $Q_f$  с начальным градиентом сдвига нефти  $G=20000$  Па/м при ВЧ нагре-

ве ( $N_0=20$  кВт и 60 кВт) и без него показаны соответственно на рис. 4 и 5. Как видно из рисунков, мощность излучателя ЭМ волн оказывает существенное влияние на расширение границы зоны фильтрации и дебит скважины.

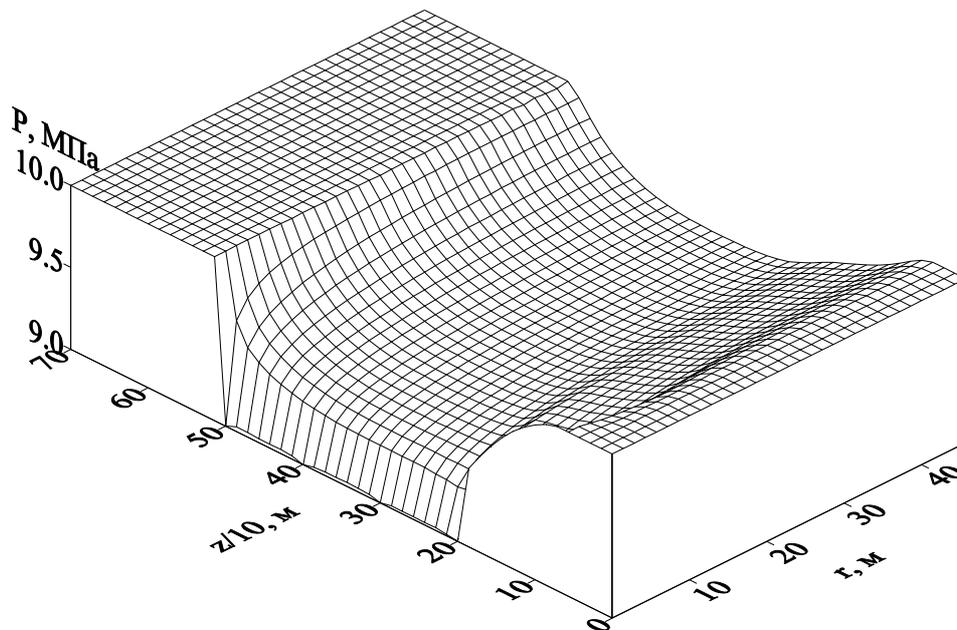


Рис. 2. Распределение давления в пласте с неньютоновской нефтью в момент времени  $t=10$  суток.  $G=2000$  Па/м;  $N_0=20$  кВт.

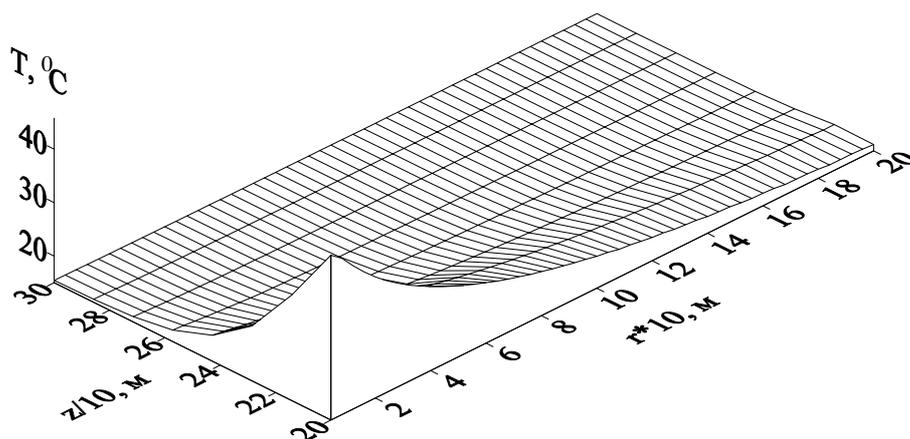


Рис. 3. Распределение температуры в пласте с неньютоновской нефтью в момент времени  $t=10$  суток.  $G=2000$  Па/м;  $N_0=20$  кВт.

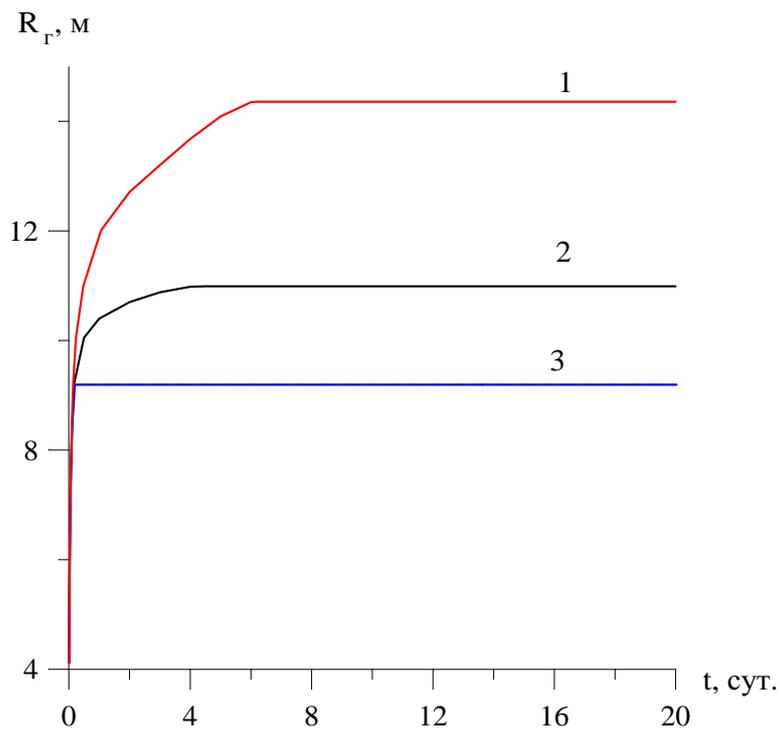


Рис. 4. Динамика движения границы зоны фильтрации.  
 $G=20000$  Па/м. 1 –  $N_0=60$  кВт; 2 –  $N_0=20$  кВт; 3 –  $N_0=0$ .

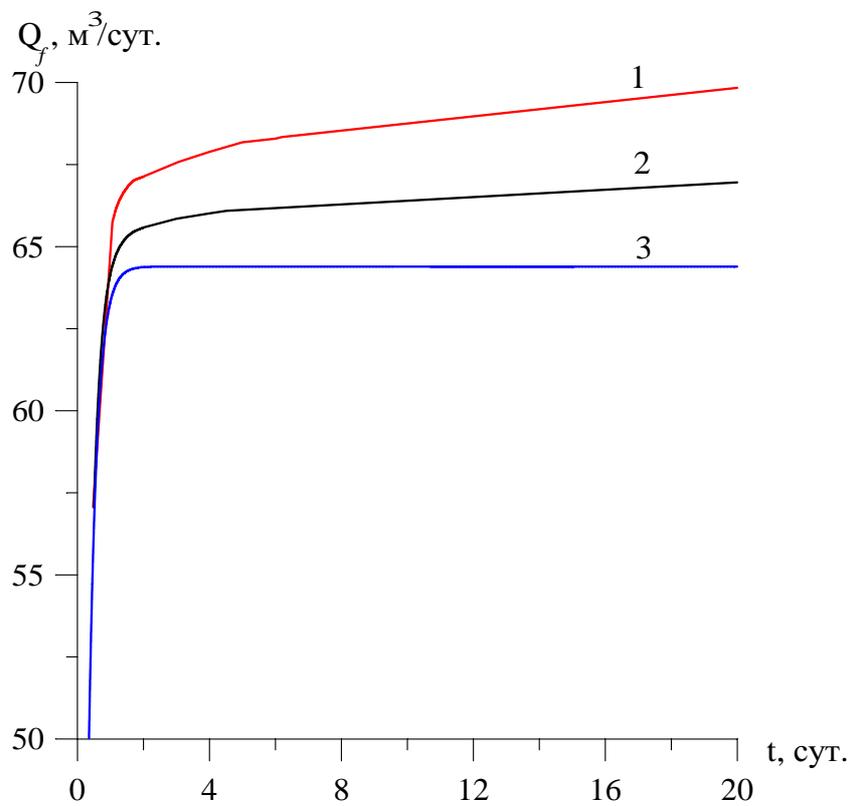


Рис. 5. Динамика изменения текущего дебита нефти.  
 $G=20000$  Па/м. 1 –  $N_0=60$  кВт; 2 –  $N_0=20$  кВт; 3 –  $N_0=0$ .

С уменьшением начального градиента сдвига влияние нагрева пласта на расширение границы зоны фильтрации уменьшается и при  $G=2000$  Па/м практически равно нулю. При нагреве и без нагрева в течение суток граница зоны фильтрации достигает границы пласта. При такой скорости движения границы зоны фильтрации, нагрев пласта не успевает оказать какого-либо заметного влияния на это движение.

### Литература

1. Бернадинер М.Г., Ентов М.М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
2. Мирзаджанзаде А.Х. О теоретической схеме явления ухода раствора // ДАН Аз.ССР. – 1953, Т.9. – №4. – С. 203 – 205.
3. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Хайдар А.М. Математическое моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева призабойной зоны горизонтальных нефтяных скважин // ИФЖ. – 2004, Т.77.– № 6. – С. 105 – 111.