

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ БОКОВЫХ СТВОЛОВ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ В СКВАЖИНЕ

Рамазанов А.Ш., Ахметов Р.К.

Башкирский государственный университет

В работе анализируется возможность диагностирования работающих интервалов боковых стволов по известным данным распределения температуры в основном стволе скважины. Учитывается конвективный теплоперенос в боковом стволе и термодинамические эффекты (баротермический эффект, эффект Джоуля - Томсона) в пласте.

Ключевые слова: *скважина, боковой ствол, температура, дроссельный эффект, теплообмен, работающие интервалы.*

В последние годы в практике разработки нефтяных месторождений для увеличения производительности скважины широко применяется бурение дополнительных боковых стволов (БС) от основного ствола скважины [1,2]. При этом возникает проблема исследования БС на этапах освоения и эксплуатации скважины, в рамках которой решаются следующие задачи:

- выделение интервалов притока из пласта в БС;
- определение дебита и характера притока (нефть, вода, газ).

В данной работе путем математического моделирования исследуется вопрос о возможностях скважинной термометрии при определении работающих интервалов БС без проникновения в БС. Распределение температуры в самой скважине может быть получено с помощью обычной термометрии, когда датчик температуры перемещается вдоль ствола скважины. Можно использовать многодатчиковую технологию, когда автономные термометры помещаются на различных глубинах ниже и выше места сочленения БС со скважиной. Аналогичные данные могут быть получены и с помощью волоконно-оптической термометрии или технологии распределенных датчиков температуры (DTS – distributed temperature sensor), которая обеспечивает измерения температуры в режиме реального времени.

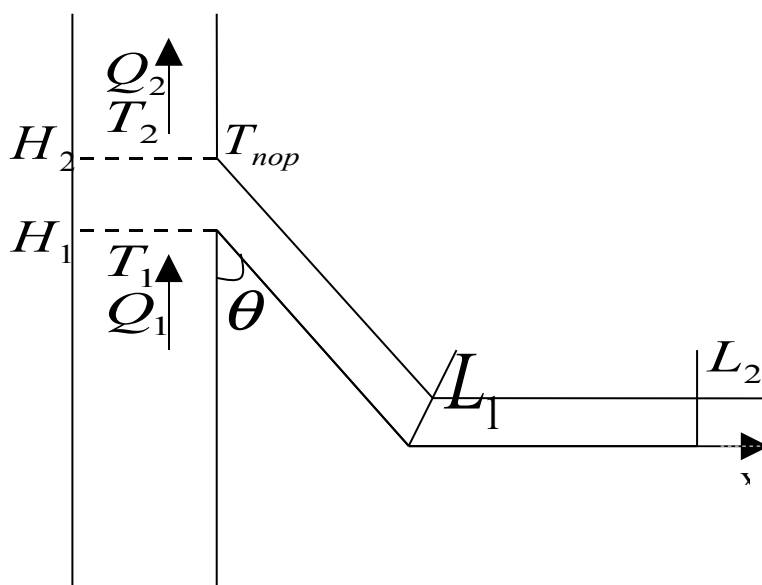


Рисунок 1. Схематическое изображение скважины и БС

На рис. 1 обозначено: T_1 и T_2 - температура на глубине H_1 и H_2 соответственно (ниже и выше места сочленения основного ствола и БС скважины). Q_1 и Q_2 - дебиты так же ниже и выше места сочленения основного ствола и БС скважины соответственно. $T_{пор}$ - температура окружающих горных пород; θ - угол наклона начального участка БС.

Если по результатам исследований в стволе скважины известны значение температуры T_1 и T_2 , дебиты Q_1 и Q_2 , объемная теплоемкость C_1 на глубине H_1 (ниже глубины зарезки БС) и H_2 (выше глубины зарезки БС), то температура поступающего из БС флюида может быть восстановлена по формуле:

$$T = \frac{T_2 [C_{\text{бс}}(Q_2 - Q_1) + C_1 Q_1] - C_1 Q_1 T_1}{C_{\text{бс}}(Q_2 - Q_1)}$$

Здесь $C_{\text{бс}}$ - объемная теплоемкость флюида, поступающего из БС. Очевидно, что исследование установившегося температурного поля в скважине не позволит определить работающие интервалы БС, поэтому далее используется характер изменения $T(t)$ - температуры поступающего из БС флюида для переходного режима, например, после пуска скважины в работу.

Далее предполагаем, что температура поступающей из БС жидкости известна (измерена или вычислена, например, по приведенной выше формуле).

Рассмотрим несколько задач об изменении температуры $T(t)$ поступающей из БС жидкости.

Задача 1: *Необходимо определить величину температурного сигнала на выходе БС, как функцию времени, а также в зависимости от конфигурации ствола, величины температурного сигнала в интервале притока и скорости движения флюида в боковом стволе, коэффициента теплообмена между БС и окружающими горными породами, угла наклона участка бокового ствола (рис. 1).*

Распространение сигнала идет от границы $x = L_2$ вдоль горизонтального участка, а затем от $x = L_1$ – вдоль наклонного под углом θ участка бокового ствола радиуса R (рис. 1).

Модельное решение получим, решив задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} = \beta (T_{nop} - T) \\ T|_{t=0} = T_{nop} = \begin{cases} T_0 + \Gamma x \cdot \cos \theta, & x \leq L_1 \\ T_0 + \Gamma L_1 \cdot \cos \theta, & x > L_1 \end{cases} \\ T|_{x=L_1} = R(T) \\ T|_{x=L_2} = \Delta T_0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь T - средняя по сечению бокового ствола температура, T_{nop} - температура окружающих горных пород, $\beta = \frac{2\alpha}{c_1 \rho_1 R}$, где α - коэффициент, учитывающий теплообмен между боковым стволом и окружающими горными породами, v - скорость движения жидкости в БС, Γ - геотермический градиент температуры.

Делая замену в (1) через: $U(x, t) = T(x, t) - \begin{cases} T_0 + \Gamma x \cdot \cos \theta, & x \leq L_1 \\ T_0 + \Gamma L_1 \cdot \cos \theta, & x > L_1 \end{cases}$,

получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} - v \Gamma \cos \theta = -\beta U \\ U|_{t=0} = T|_{t=0} - T_{nop} = 0 \\ U|_{x=L_1} = \psi(t) \\ x \leq L_1 \\ U|_{t=0} = T|_{t=0} - T_{nop} = 0 \\ U|_{x=L_1} = \Delta T_0 \\ L_1 < x < L_2 \end{cases} \quad (1.1)$$

Из (1.1) можно выделить две задачи:

$$x \leq L_1: \begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} - v\Gamma \cos \theta = -\beta U \\ U|_{t=0} = 0 \\ U|_{x=L_2} = \psi(t) \end{cases} \quad (1.1')$$

$$L_1 < x < L_2: \begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} = -\beta U \\ U|_{t=0} = 0 \\ U|_{x=L_2} = \Delta T_0 \end{cases} \quad (1.2')$$

Чтобы решить систему (1.1'), сначала решаем (1.2') с помощью преобразования Лапласа для того, чтобы найти интересующую нас функцию $\psi(t)$:

$$t \rightarrow S, U(x, t) \rightarrow F(S), F(S) = \int_0^{\infty} U(x, t) \cdot e^{-St} dt$$

После преобразования:

$$\begin{cases} SF - v \frac{\partial F}{\partial x} = -\beta F \\ F|_{t=0} = 0 \\ F|_{x=L_2} = \frac{\Delta T_0}{S} \\ L_1 < x < L_2 \end{cases} \quad (1.3)$$

Из системы (1.3), получим $F = C \exp\left(\frac{S+\beta}{v}x\right)$

Неизвестную постоянную C найдем из граничного условия

$$C = \frac{\Delta T_0}{S} \exp\left(-\frac{S+\beta}{v}L_2\right), \text{ затем подставив } C, \text{ мы получим } F :$$

$$F = \frac{\Delta T_0}{S} \exp\left(-\frac{S+\beta}{v}(L_2-x)\right)$$

Совершаем обратный переход преобразования Лапласа:

$$U(x, t) = \Delta T_0 \exp\left(-\beta \frac{L_2-x}{v}\right) \gamma\left(t > \frac{L_2-x}{v}\right) \quad (1.4)$$

$$\psi(t) = U(L_1, t) \quad U(L_1, t) = \Delta T_0 \exp\left(-\beta \frac{L_2-L_1}{v}\right) \gamma\left(t > \frac{L_2-L_1}{v}\right) \quad (1.5)$$

Решим систему (1.1') с помощью преобразования Лапласа:

$$\begin{cases} SF - v \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\Gamma v \cos \theta}{S} = -\beta F \\ F|_{t=0} = 0 \\ F|_{x=L_1} = \frac{\Delta T_0}{S} e^{-t_2(S+\beta)} \\ x < L_1 \end{cases} \quad (1.6)$$

$$F = \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} + A e^{\frac{S+\beta}{v}x}$$

$$A = F|_{x=L_1} e^{-\frac{S+\beta}{v}L_1} - \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} e^{-\frac{S+\beta}{v}L_1}$$

$$F = \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} + \frac{\Delta T_0}{S} e^{-\frac{S+\beta}{v}(t_2+t_1-\frac{x}{v})} - \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} e^{-\frac{S+\beta}{v}(L_1-x)} \quad (1.7)$$

Совершаем обратный переход преобразования Лапласа:

$$U(x, t) = \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta} + \Delta T_0 e^{-\beta(t_2+t_1-\frac{x}{v})} \gamma\left(t > t_2+t_1-\frac{x}{v}\right) +$$

$$+ \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta(t-t_1-\frac{x}{v})}}{\beta} e^{-\beta(t_1-\frac{x}{v})} \gamma\left(t > t_1-\frac{x}{v}\right) \quad (1.8)$$

Из (1.8) получим величину аномалии температуры в точке выхода температурного сигнала из наклонно-горизонтального бокового ствола:

$$U(0, t) = \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta} + \Delta T_0 e^{-\beta(t_2+t_1)} \gamma(t > t_2+t_1) + \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta(t-t_1)}}{\beta} e^{-\beta t_1} \gamma(t > t_1)$$

$$U(0, t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta}, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta t_1}}{\beta}, & t_2+t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta t_1}}{\beta} + \Delta T_0 e^{-\beta(t_2+t_1)}, & t \geq t_2+t_1 \end{cases} \quad (1.9)$$

Без учета теплообмена аномалия температуры на выходе из бокового ствола будет:

$$U(0, t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \cdot t, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t, & t_2+t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t_1 + \Delta T_0, & t \geq t_2+t_1 \end{cases} \quad (1.10)$$

Расчеты (см. рис. 2) по формулам: (1.9), (1.10) проведены для следующих значений параметров: $\Gamma = 0,014 \text{ K/м}$, $Q = 10 \text{ м}^3 / \text{сут}$, $\alpha = 6 \text{ Вм/м}^2 / \text{K}$,

$C=2000 \text{ Дж/кг/К}$, $\rho=800 \text{ кг/м}^3$, $L_2=100 \text{ м}$, $L_1=50 \text{ м}$, $R=0.1 \text{ м}$,
 $\Delta T_0=0.15 \text{ К}$.

Формулы (1.9) и (1.10) позволяют оценить уменьшение температурного сигнала ΔT_0 , обусловленного притоком жидкости из пласта в БС, при дальнейшем движении жидкости в боковом стволе из-за теплообмена с горными породами.

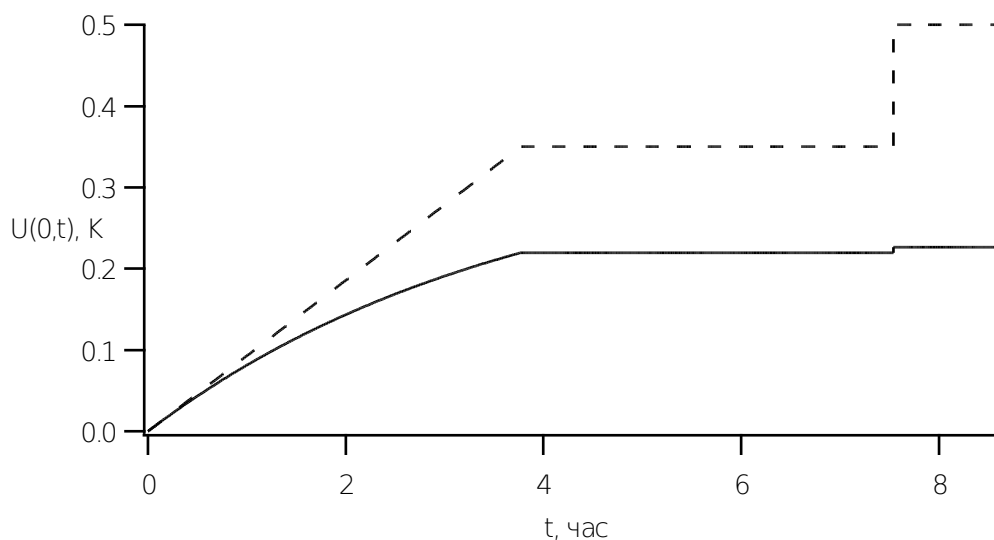


Рисунок 2. Изменение температуры на выходе из БС во времени

Задача 2: Необходимо получить зависимость между нестационарной температурой на выходе из БС и нестационарной температурой в интервале притока в БС.

В этом случае также распространение сигнала идет от границы $x = L_2$ (в которой температура является функцией зависящей от времени, мы рассмотрим произвольную функцию) вдоль горизонтального участка, а затем от $x = L_1$ — вдоль наклонного под углом θ участка бокового ствола радиуса R , (рис. 1).

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} = \beta (T_{nop} - T) \\ T|_0 = T_{nop} = \begin{cases} T_0 + \Gamma x \cdot \cos \theta, & x \leq L_1 \\ T_0 + \Gamma L_1 \cdot \cos \theta, & x > L_1 \end{cases} \\ T|_{x=L_2} = T_0 + \Gamma L_1 \cdot \cos \theta + P(t) \end{cases} \quad (2)$$

Фактически уже решенная нами задача (1), в которой температура на границе $x=L_2$ равна константе ΔT_0 , является частным случаем задачи (2).

Делая замену в (2) через $U(x, t) = T(x, t) - \begin{cases} T_0 + \Gamma x \cdot \cos \theta, & x \leq L_1 \\ T_0 + \Gamma L_1 \cdot \cos \theta, & x > L_1 \end{cases}$, получим

систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} - v \Gamma \cos \theta = -\beta U \\ U|_{t=0} = T|_{t=0} - T_{nop} = 0 \\ U|_{x=L_1} = \psi(t) \\ x \leq L_1 \\ \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} = -\beta U \\ U|_{t=0} = T|_{t=0} - T_{nop} = 0 \\ U|_{x=L_2} = \varphi(t) \\ L_1 < x < L_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Из (2.1) выделим две задачи:

$$x \leq L_1: \begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} - v \Gamma \cos \theta = -\beta U \\ U|_{t=0} = 0 \\ U|_{x=L_1} = \psi(t) \end{cases} \quad (2.1')$$

$$L_1 < x < L_2: \begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - v \frac{\partial U}{\partial x} = -\beta U \\ U|_{t=0} = 0 \\ U|_{x=L_2} = \varphi(t) \end{cases} \quad (2.2')$$

Аналогично системе (1.2') решаем систему (2.2'), чтобы получить функцию $\psi(t)$, для решения системы (2.1'):

$$U(x, t) = \varphi\left(t - \frac{L_2 - x}{v}\right) \exp\left(-\beta \frac{L_2 - x}{v}\right) \gamma\left(t > \frac{L_2 - x}{v}\right)$$

$$\psi(t) = U(L_1, t) = \varphi\left(t - \frac{L_2 - L_1}{v}\right) \exp\left(-\beta \frac{L_2 - L_1}{v}\right) \gamma\left(t > \frac{L_2 - L_1}{v}\right) \quad (2.3)$$

$$\frac{L_2 - L_1}{v} = t_2 \Rightarrow \psi(t) = \varphi(t - t_2) \exp(-\beta t_2) \gamma(t > t_2)$$

Теперь решаем систему (2.1') с помощью преобразования Лапласа.
Получим:

$$F = \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} + A e^{\frac{S+\beta}{v}x}$$

$$A = F|_{x=L_1} e^{-\frac{S+\beta}{v}L_1} - \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} e^{-\frac{S+\beta}{v}L_1}$$

$$F = \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} + \varphi(t) e^{-\frac{S+\beta}{v}(L_1-x)} - \frac{\Gamma v \cos \theta}{S(S+\beta)} e^{-\frac{S+\beta}{v}(L_1-x)}, \text{ тогда}$$

$$U(x, t) = \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta t}}{\beta} + \psi\left(t - \frac{L_1-x}{v}\right) e^{-\beta\left(\frac{L_1-x}{v}\right)} \gamma\left(t > \frac{L_1-x}{v}\right) +$$

$$+ \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta\left(t - \frac{L_1-x}{v}\right)}}{\beta} e^{-\beta\left(\frac{L_1-x}{v}\right)} \gamma\left(t > \frac{L_1-x}{v}\right)$$

В точке выхода флюида из бокового ствола скважины ($x = 0$) имеем:

$$U(0, t) = \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta t}}{\beta} + \psi(t-t_1) e^{-\beta\left(\frac{L_1-x}{v}\right)} \gamma(t > t_1) +$$

$$+ \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta(t-t_1)}}{\beta} e^{-\beta t_1} \gamma(t > t_1) \quad (2.4)$$

Из (2.4) можно составить систему:

$$U(0, t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta t}}{\beta}, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta t_1}}{\beta}, & t_2+t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1-e^{-\beta t_1}}{\beta} + \varphi(t-t_1-t_2) e^{-\beta(t_1+t_2)}, & t \geq t_2+t_1 \end{cases} \quad (2.5)$$

Без учета теплообмена аномалия температуры на выходе из бокового ствола будет:

$$U(0, t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \cdot t, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t_1, & t_2+t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t_1 + \varphi(t-t_1-t_2), & t \geq t_2+t_1 \end{cases} \quad (2.6)$$

В нашей модели для расчетов приняли изменение температуры притекающей из пласта жидкости за счет дроссельного эффекта по формуле Чекалюка Э.Б.[3]:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon Q \mu}{4 \pi \kappa L} \ln \left(1 + 2 \frac{c Q t}{\pi L r_c^2} \right) \quad (2.7)$$

С учетом (2.7), системы (2.5) и (2.6) примут вид:

$$U(0,t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta \cdot t}}{\beta}, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta \cdot t_1}}{\beta}, & t_2 + t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \frac{1 - e^{-\beta \cdot t_1}}{\beta} + \frac{\varepsilon Q \mu}{4 \pi \kappa L} \ln \left(1 + 2 \frac{c Q (t - t_1 - t_2)}{\pi L r_c^2} \right) e^{-\beta(t_1 + t_2)}, & t \geq t_2 + t_1 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$U(0,t) = \begin{cases} \Gamma v \cos \theta \cdot t, & t < t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t_1, & t_2 + t_1 > t \geq t_1 \\ \Gamma v \cos \theta \cdot t_1 + \frac{\varepsilon Q \mu}{4 \pi \kappa L} \ln \left(1 + 2 \frac{c Q (t - t_1 - t_2)}{\pi L r_c^2} \right) e^{-\beta(t_1 + t_2)}, & t \geq t_2 + t_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Расчеты по формулам (2.8) и (2.9) проведены для следующих значений параметров:

$$\begin{aligned} \Gamma &= 0,014 \text{ К/м}, \quad Q = 10 \text{ м}^3/\text{сут}, \quad \alpha = 6 \text{ Вт/м}^2/\text{К}, \quad C = 2000 \text{ Дж/кг/К}, \\ \rho &= 800 \text{ кг/м}^3, \quad L_2 = 100 \text{ м}, \quad L_1 = 50 \text{ м}, \quad R = 0,1 \text{ м}, \quad c = 0,8, \\ \mu &= 10 \text{ сПз}, \quad k = 0,1 \text{ Д}, \quad \varepsilon = 0,04. \end{aligned}$$

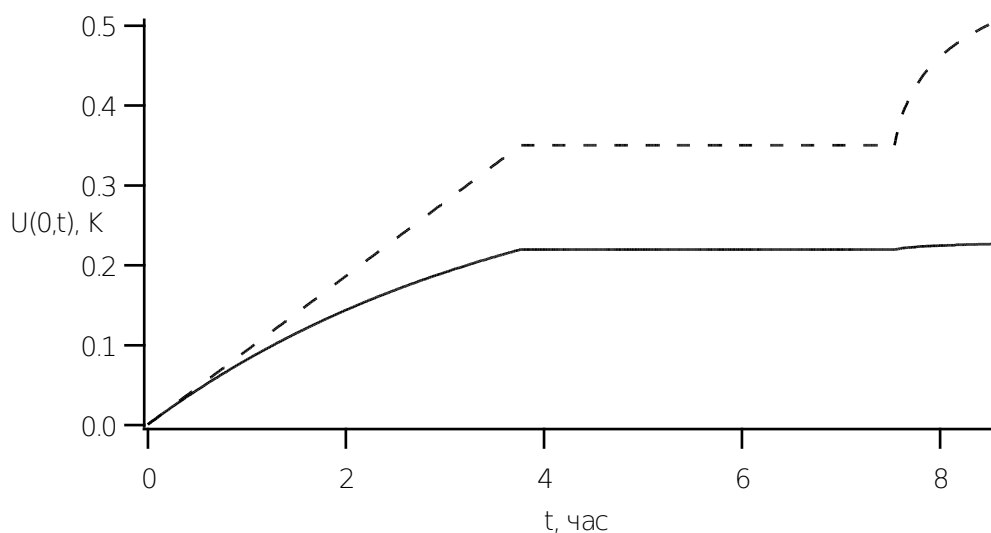


Рисунок 3. Изменение температуры на выходе из БС во времени

На графике видно, что изменение температуры на выходе из бокового ствола происходит этапами, которые характеризуются временем прохождения температурного фронта от $x = L_1$ и $x = L_2$. Из сравнения формул (2.8) и (2.9)

так же видно, что характер изменения температуры во времени, которое формируется в интервале притока в БС, сохраняется и на выходе из БС скважины. Величина изменения температуры уменьшается за счет теплообмена с окружающей БС средой так же, как в случае постоянной температурной аномалии (сравни ф-лы (1.9) и (2.8)). Ослабление температурного сигнала может быть значительным, как на рис. 3, оно зависит от значения коэффициента β и времени движения температурного фронта в БС.

Выводы

В работе построены математические модели тепломассопереноса в боковом стволе скважины, которые позволяют:

- исследовать зависимость температурной аномалии на выходе из БС от различных параметров системы;
- решать обратные задачи по определению работающего интервала БС.

Литература

1. K. Yoshioka, D. Zhu, A.D. Hill, L.W. Lake. Interpretation of Temperature and Pressure Profiles Measured in Multilateral Wells Equipped with Intelligent Completions. SPE 94097. 2005.
2. A. Romero, D. Zhu, and A.D. Hill Temperature Behavior in Multilateral Wells: Application to Intelligent Wells. SPE 94982. 2005.
3. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта.- М.: Недра, 1965.- 238с.