

## **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.

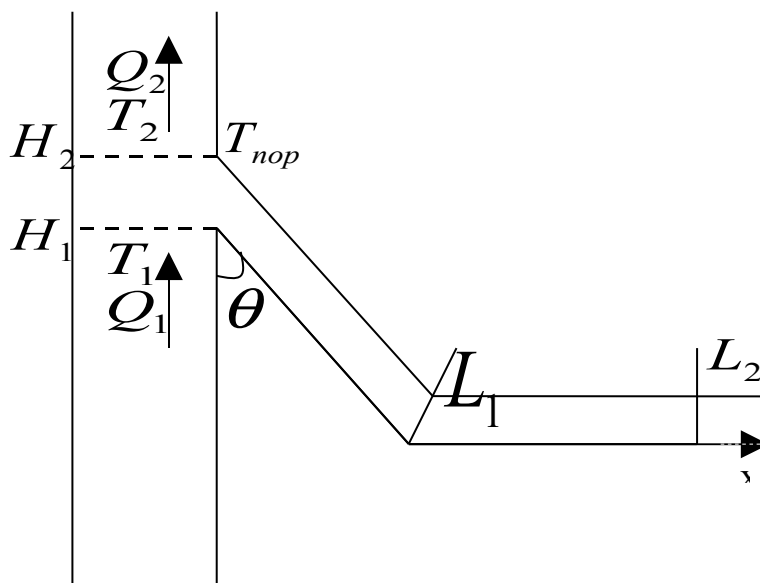


Рисунок 1. Схематическое изображение скважины и БС

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;  $\theta$  - 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  $\theta$  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  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий теплообмен между боковым стволом и окружающими горными породами,  $v$  - скорость движения жидкости в БС,  $\Gamma$  - 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  $\Delta T_0$ , обусловленного притоком жидкости из пласта в БС, при дальнейшем движении жидкости в боковом стволе из-за теплообмена с горными породами.

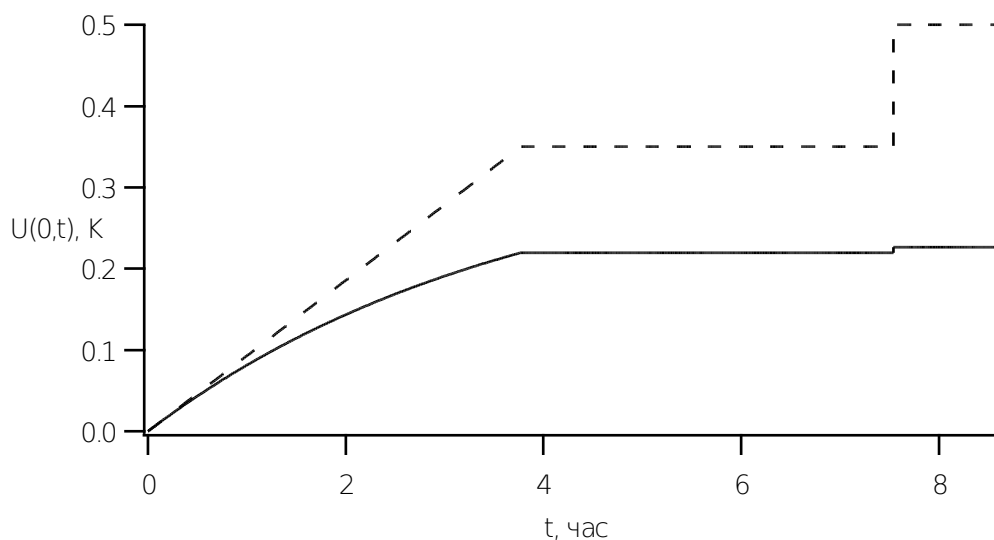


Рисунок 2. Изменение температуры на выходе из БС во времени

**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  $\theta$  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  $\Delta T_0$ , 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:

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

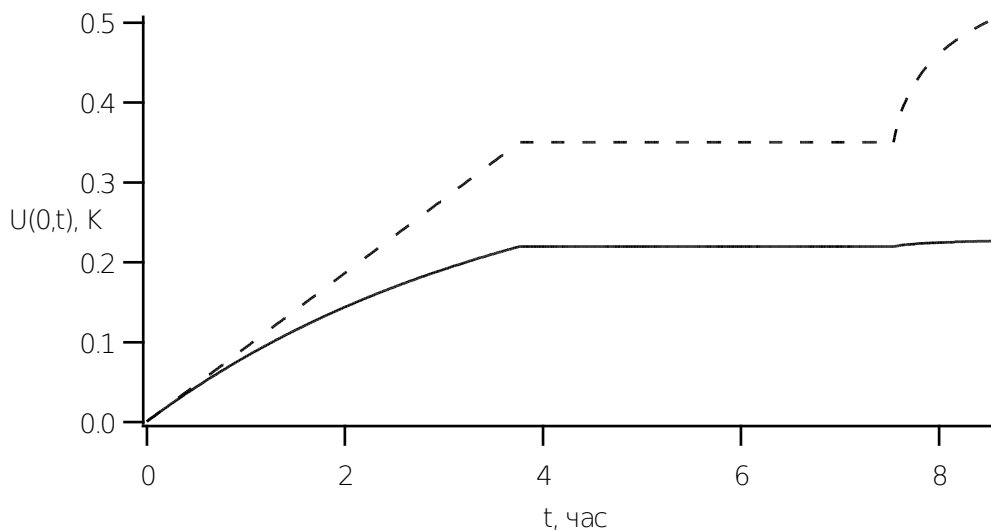


Рисунок 3. Изменение температуры на выходе из БС во времени

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  $\beta$  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.