

УДК 622.233

**О.А. Жерелов**

## **ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАБОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ БУРЕНИИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД**

*Определены основные факторы, оказывающие влияние теплового воздействия термомеханического инструмента на скорость бурения мерзлых пород.*

*Ключевые слова: термодинамический буровой инструмент, тепловое воздействие на забой скважины, способы разработки мерзлых грунтов.*

**Семинар № 4**

Одними из самых трудоемких и дорогостоящих строительных и дорожных видов работ является разработка грунтов, на долю которых, например, в строительстве, приходится более 10% общей стоимости. При этом, от 20 до 40% годового объема работ занимает разработка мерзлых грунтов, затраты на которую в десятки раз превышают стоимость земляных работ в теплое время года [1]. В последние годы, в связи с тенденцией перемещения районов разведки и добычи энергоресурсов и полезных ископаемых к северу страны актуальность разработки мерзлых грунтов значительно возросла.

Одним из наиболее эффективных способов разрушения мерзлых грунтов является комбинированный термомеханический (ТМ) способ, заключающийся в одновременном воздействии двух видов энергии: тепловой и механической.

Наиболее просто этот способ осуществляется при бурении шпуров и скважин различного назначения. Практический интерес представляет анализ теплового воздействия теплоносителя на забой скважины в процессе бурения, с целью выявления факторов, определяющих его эффективность.

ТМ разрушение мерзлого грунта в аналитическом виде представляет собой задачу о термически напряженно-деформированном состоянии неоднородного полупространства, вызванном источником тепла.

Рассмотрим процесс теплового воздействия на забой при следующих допущениях:

- мерзлый грунт предполагается однородным, физические свойства скелета грунта и цемента-льда одинаковыми;

- слой грунта, ослабленный в результате теплового воздействия, снимается механическим инструментом и уносится из скважины;

- начальные условия процесса перед последующими циклами ТМ воздействия восстанавливаются;

- нагрев поверхности забоя равномерный, а время нагрева равно времени между последующими циклами механического воздействия;

- под воздействием источника тепла мерзлая среда прогревается. Прогрев происходит в две стадии: первая - тепло отводится внутрь тела за счет теплопроводности до тех пор, пока грунт не достигнет температуры фазового перехода, вторая - оттаивание мерзлой среды.

Таким образом, задача о распределении температуры при наличии фазового перехода и о скорости движения границы раздела фаз сводится к решению системы дифференциальных уравнений теплопроводности

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{для } 0 < x < \xi \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \text{для } \xi < x < \infty \end{aligned} \quad (1)$$

Дополнительные условия

$$T_1 = T_n \quad \text{при } x = 0, \quad (2)$$

$$T_2 = T_0 \quad \text{при } t = 0$$

Граничные условия

$$T_1 = T_2 = 0 \quad \text{при } x = \xi, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\xi} = LW\rho \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

где  $T_1$  - температура талой зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2$  - температура мерзлой зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, a_1, a_2$  - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, соответственно, мерзлой и талой зон;  $L$  - теплота фазового перехода «вода-лед»;  $W$  - влажность грунта, в долях единицы;  $\rho$  - плотность породы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Решение уравнения (1) при условиях (2) и (3) известно [2]:

$$\left\{ T_1(x,t) = T_n - \frac{T_n}{\Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}\right)} \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1}t}\right) \right. \quad (4)$$

$$\left. T_2(x,t) = -\frac{T_0 \Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)} + \frac{T_0}{1 - \Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)} \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2}t}\right), \right. \quad (5)$$

где  $\Phi(x)$  - интеграл ошибок,

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz.$$

Постоянная  $\beta$  - находится и решения нелинейного уравнения (3):

$$\frac{\lambda_1 T_n \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_1}\right)}{\sqrt{a_1} \Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}\right)} + \frac{\lambda_2 T_0 \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2}\right)}{\sqrt{a_2} \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)\right]} = LW\rho\beta \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (6)$$

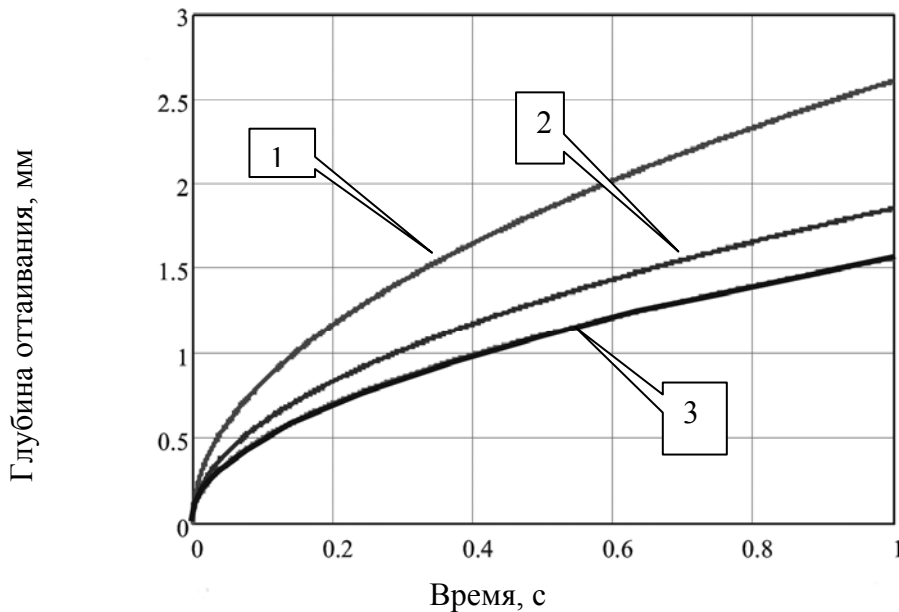
В плоской постановке задачи глубина промерзания определяется по формуле

$$\xi = \beta\sqrt{t} \quad (7)$$

Для расчета приняты следующие исходные данные. Температура теплоносителя  $200^{\circ}\text{C}$ . Начальная температура мерзлой породы  $-10^{\circ}\text{C}$ . Длительность времени нагрева породы в забое между циклами механического разрушения поверхностного слоя составляет не более 1 сек. Практический интерес представляет оценка глубины оттаивания поверхностного слоя в течение указанного времени и величина термических напряжений в поверхностном слое мерзлой породы.

В качестве теплоносителя целесообразно использовать отработавшие разогретые газы двигателя автомобиля (гусеничной машины, передвижного электроагрегата) или малогабаритных газогенераторных установок, выпускаемых промышленностью.

Следует отметить, что использование газообразного теплоносителя в термомеханическом инструменте обусловлено необходимостью не только теплового воздействия на забой с целью более эффективного разрушения, но также необходимостью продувки скважины и очистки забоя от бурового шлама. В данном случае фактор использования отработанных газов двигателя автомобиля (агрегата)



$c_0=800$  Дж/(кг·К);  $\lambda_0=2$  Вт/(м·К);  $\rho=2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_0=-10^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{п}}=200^\circ\text{C}$ ;  
 1)  $W=0$ ; 2)  $W=0,1$ ; 3)  $W=0,2$

**Рис. 1. Глубина оттаивания мерзлого грунта в забое при различных влажностях**

позволяет исключить использование воздушного компрессора, что в свою очередь дает возможность существенно снизить металлоемкость бурового оборудования и энергозатраты на процесс бурения.

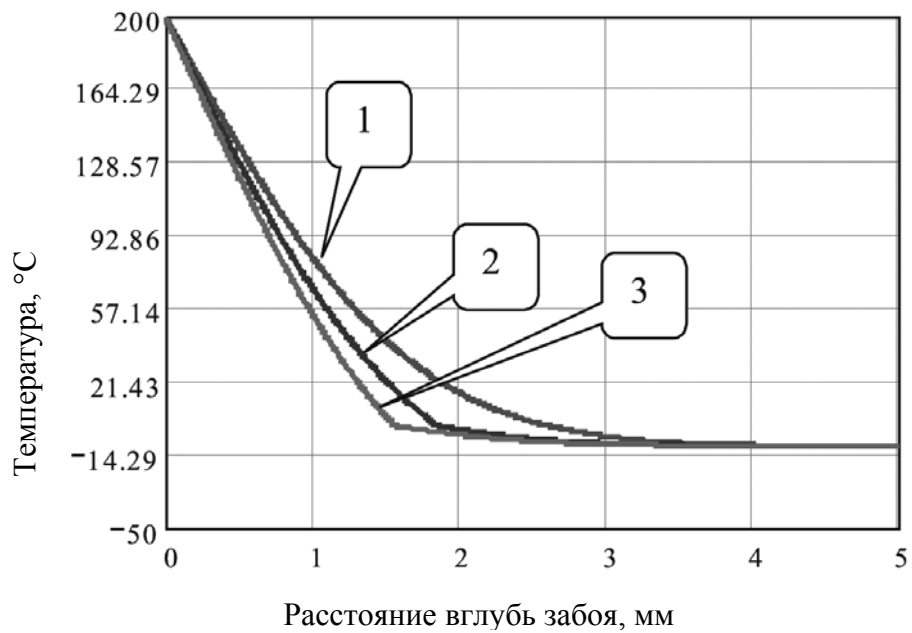
На рис. 1 представлено распределение зоны оттаивания вглубь забоя при различных влажностях грунта. Видно, что в практически сухом грунте через 1 секунду зона с нулевой температурой распространяется на 2,5 мм. Если мерзлый грунт имеет высокую природную влажность ( $W=0,2$ ), то зона оттаивания существенно меньше и не превышает 1,5 мм.

На рис. 2 представлено распределение температуры вглубь забоя при указанных условиях.

Видно, что верхний поверхностный слой мерзлой породы в течение

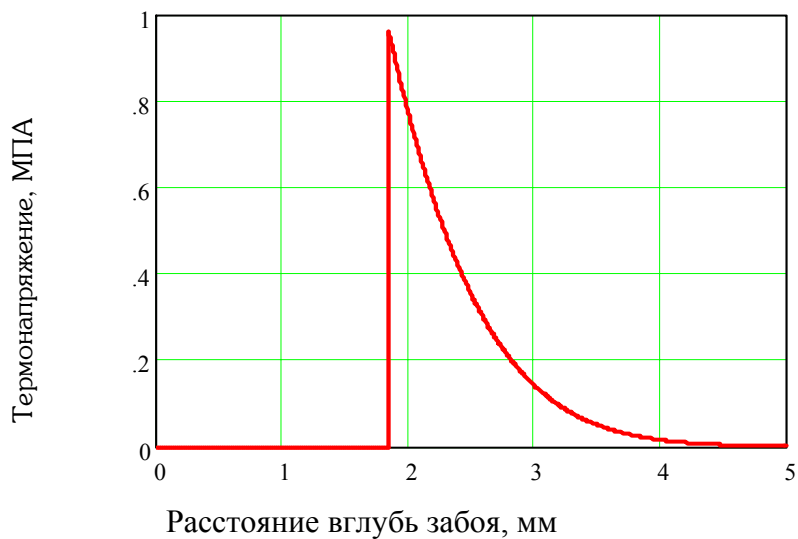
одной секунды воздействия теплоносителя оттаивает на глубину до 1,5 мм. Для случая очень большой влажности мерзлого грунта ( $W=0,2$ ) это соответствует скорости его ослабления в процессе оттаивания не менее 5,4 м/час. При влажности близкой к нулевой величине этот же показатель соответствует 9 м/час. В неявном виде такие темпы оттаивания забоя в процессе термомеханического бурения коррелируют со скоростью термомеханического бурения. Иными словами, сравнивая полученные значения с реальными скоростями термомеханического бурения можно утверждать, что вклад процесса оттаивания в процесс бурения мерзлых пород весьма существенен.

Второй фактор – это влияние термических напряжений, возникающих



$c_0=800$  Дж/(кг·К);  $\lambda_0=2$  Вт/(м·К);  $\rho=2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_0=-10^\circ\text{C}$ ;  $T_n= 200^\circ\text{C}$ ;  
 1)  $W=0$ ; 2)  $W=0,1$ ; 3)  $W=0,2$

**Рис. 2. Распределение температуры вглубь забоя в процессе термомеханического бурения**



**Рис. 3. Термические напряжения в забое скважины**

ниже зоны оттаивания. Максимально возможная величина этих напряжений в плоскости забоя составляет

$$\sigma_m = \beta_m E \Delta T, \quad (8)$$

где  $\sigma_m$  – термические напряжения, Па;  $\beta$  – коэффициент линейного расширения, 1/град;  $E$  – модуль деформации, Па;  $\Delta T$  – разность температур между талой и мерзлой зоной,  $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ .

Термические напряжения непосредственно на контакте мерзлой и талой зоны достигают максимума и уменьшаются с глубиной. Аналитическая зависимость, которая должна учитываться в суперпозиции механических и термических напряжений в первом приближении выглядит так

$$\sigma_m(x, t) = \beta_m E (T_2(x, t) - T_0) \quad (9)$$

На рис. 3 представлено распределение указанных сжимающих терми-

ческих напряжений, параллельных свободной поверхности.

Существенного вклада эти термонапряжения на глубину лунки выкола в мерзлой зоне грунта не оказывают. Их действие распространяется на глубину менее 1 мм вглубь забоя, где величина термонапряжений находится в пределах от 1 до 0,2 МПа. Как отмечалось ранее, основной вклад фактора теплового воздействия при бурении в мерзлых породах заключается в оттаивании поверхностного слоя и чем выше температура теплоносителя, тем выше достигается эффект повышения скорости бурения.

Полученные результаты анализа основных факторов, оказывающих влияние теплового воздействия на скорость бурения мерзлых грунтов, могут быть использованы для оптимизации режима термомеханического бурения скважин и термодинамических параметров бурового инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Мартюченко И.Г. Мерзлоторыхлительный инструмент с винтовым рабочим органом. Строительные и дорожные машины. 2006. №11. с. 33-34.

2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967, 599 с. **ИДБ**

#### Коротко об авторе

Жерелов О.А. – аспирант, Военный институт (инженерных войск) ОА ВС РФ, ole3134@yandex.ru

