

УДК 622.244
ББК И

Р. А. Гасумов, В. А. Толпаев, О. С. Кондренко
г. Ставрополь, Россия

Вывод системы уравнений для приближенного расчета температуры бурового раствора при проводке скважины в многолетнемерзлой породе

Предложен приближенный метод расчета количества тепла, которое буровой раствор отдает в многолетнемерзлую породу, окружающую скважину. Выведены дифференциальные уравнения теплового баланса для скважины с теплоизолированной стенкой. Для расчета фактического распределения температуры применяется поправочный коэффициент. Результаты статьи проиллюстрированы тестовым расчетом, представленным в виде графика.

Ключевые слова: скважина, многолетнемерзлая порода, теплопроводность.

R. A. Gasumov, V. A. Tolpaev, O. S. Kondrenko
Stavropol, Russia

Derivation of Equations Set for the Approximate Calculation of the Drilling Fluid Temperature in the Permafrost Well

An approximate method of calculating the amount of heat that drill mud delivers into the permafrost, surrounding the hole. The differential equations of thermal balance for a well with a thermally insulated wall are derived. To calculate the actual temperature distribution a correction factor is used. Our results are illustrated by the test calculations presented in a kind of graphic.

Keywords: the well, permafrost, thermal conductivity.

Проектирование скважин, предназначенных для разработки газовых месторождений в районах Крайнего Севера, осуществляется с обязательным учетом оценки радиусов протаивания многолетнемерзлых пород (ММП) вокруг строящейся скважины. Расчет радиусов протаивания ММП необходим для правильного выбора бурового раствора при бурении скважины под кондуктор, для нахождения его температуры на входе, а также для определения оптимальной скорости проводки.

Расчетная схема теплового взаимодействия нисходящего и восходящего потоков бурового раствора приведена на рис. 1:

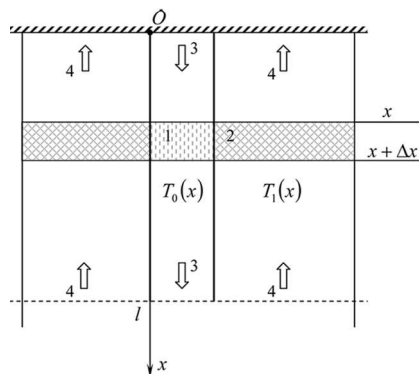


Рис. 1.

где 1 – сегмент буровой колонны, 2 – сегмент ствола скважины,
3 – нисходящий поток бурового раствора, 4 – восходящий поток бурового раствора,
 D_0 – внешний диаметр буровой колонны, D_c – диаметр скважины

В процессе бурения скважины по буровой колонне (1) вниз к долоту направляется буровой раствор (3), который затем выходит из отверстий долота и направляется обратно вверх (4), как схематически показано на рис. 1. Восходящий поток бурового раствора выносит на дневную поверхность шлам разбуренной породы и воду, получающуюся при таянии льда ММП. На рис. 1 температуры нисходящего (3) и восходящего (4) потоков бурового раствора обозначены соответственно как $T_0(x)$ и $T_1(x)$ (в градусах Кельвина). Через x и l (в м) соответственно обозначены декартовы координаты текущей точки наблюдения и местоположения долота. Начало отсчета на направленной вертикально вниз координатной оси идет от дневной поверхности.

Буровой раствор, имея на входе начальную температуру $T_{вх}$ и двигаясь вниз по буровой колонне, доходит до долота и получает от него дополнительное количество тепла, выделяемого долотом при работе. Поэтому температура $T_0(x)$ в нисходящем потоке бурового раствора растет по пути к долоту, как это показано в виде графика, выходящего из точки (1,0) на рис. 2. Скорость роста температуры нисходящего потока различна на разных участках. Точка излома графика зеленого цвета соответствует началу участка интенсивного тепловыделения, исходящего от работающего долота.

Схема распределения температур в нисходящем и восходящем потоках бурового раствора для случаев, когда стенка скважины теплоизолирована от окружающей породы и когда есть тепловой контакт с окружающей ММП, приведена на рис. 2:

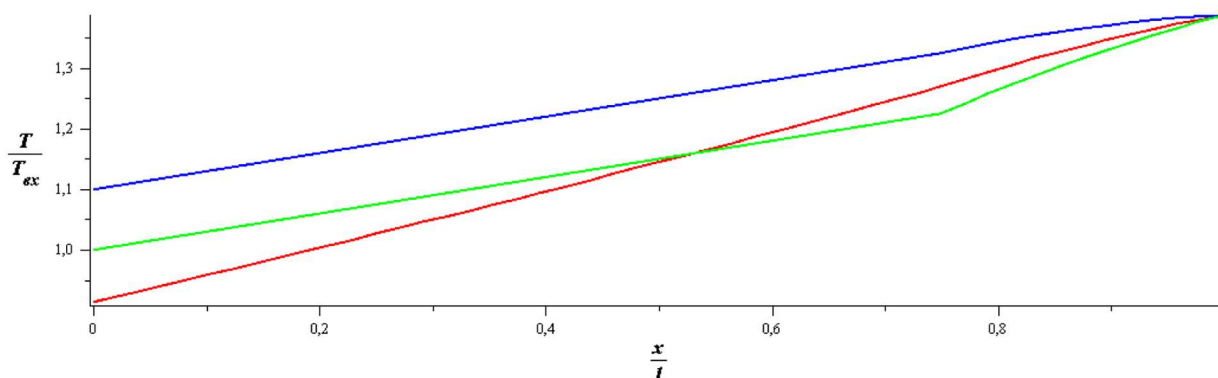


Рис.2.

Здесь линии, выходящие из точек (0), (1,0) и (1,1), представляют распределение температур соответственно в восходящем потоке с учетом теплообмена, в нисходящем потоке и в восходящем потоке без учета теплообмена с окружающей породой.

Дополнительно нагретый работающим долотом буровой раствор выходит из отверстий долота и далее движется вверх, вынося шлам от разбуренной породы и подогревая его до своей температуры, а также растапливая лед в разбуренной ММП. Поэтому при обратном движении вверх температура бурового раствора в восходящем потоке падает, вследствие теплопотерь на подогрев шлама ММП и растопление льда. Кроме того, температура восходящего потока по пути вверх падает вследствие теплообмена через стенку буровой трубы с холодным нисходящим потоком. Если не учитывать теплового взаимодействия восходящего потока бурового раствора с окружающей ММП (например, в предположении, что стенка разбуренной скважины теплоизолирована), то падение температуры $T_1(x)$ по пути вверх в восходящем потоке на рис. 2 будет определяться верхним графиком. Без учета теплообмена с окружающей ММП на выходе буровой раствор, как показывают расчеты, будет иметь температуру $T_{вых}^*$ более высокую, чем на входе $T_{вх}$. Поэтому график температуры $T_1(x)$ на рис. 2 располагается выше графика температуры $T_0(x)$. Однако в действительности стенка разбуренной скважины находится в тепловом контакте с окружающей ММП, и фактическая температура $T_{вых}$ бурового раствора на выходе бывает ниже температуры на входе $T_{вх}$. Поэтому график (красного цвета) фактической температуры $T_{11}(x)$ (из точки (0)) восходящего потока бурового раствора в точке выхода оказывается ниже графика (зеленого цвета) температуры $T_0(x)$ (из точки (1,0)).

Разница температур $T_1(x)$ и $T_{11}(x)$, представленных на рис. 2 соответственно из точек (1,1) и (0), обусловлена оттоком тепла из движущегося вверх бурового раствора в окружающую скважину ММП. Поэтому для расчета радиусов протаивания ММП вокруг скважины нужно знать функции

ональные зависимости температуры $T_0(x)$ в нисходящем потоке, а также теоретической $T_1(x)$ (без учета теплообмена с ММП) и фактической $T_{11}(x)$ (учитывающей теплообмен с ММП) температур в восходящем потоке.

Целью статьи является вывод уравнений для расчета названных температур. Перечислим исходные данные, которые потребуются для расчета температур $T_0(x)$, $T_1(x)$ и $T_{11}(x)$:

- 1) объемные скорости ($\text{м}^3/\text{с}$) бурового раствора q_0 и q_1 в нисходящем и восходящем потоках;
- 2) объемные теплоемкости (в $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{°K}}$) бурового раствора c_{0p} и c_{1p} в нисходящем и восходящем потоках соответственно, $c_{\text{пор}}$ – разбуриваемой породы, $c_{\text{в}}$ – воды;
- 3) скрытая объемная теплота плавления льда L – $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$;
- 4) льдистость разбуриваемой многолетнемерзлой породы $\omega(x)$ – $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- 5) коэффициент теплопередачи α (в $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°K}}$) через стенку буровой колонны от нисходящего потока бурового раствора к восходящему;
- 6) внешний диаметр буровой колонны D_0 и разбуриваемой скважины D_c (в м);
- 7) $\sigma_0(x) \geq 0$ и $\sigma_1(x) \geq 0$ – абсолютные величины линейных плотностей распределения сторонних тепловых источников (в нисходящем потоке бурового раствора) и стоков (в восходящем потоке) соответственно – в $\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с}}$.

С помощью заданной плотности $\sigma_0(x)$ тепловых источников учитывается генерация тепловой энергии работой долота на забое (силами трения буровой трубы о буровой раствор) и работой сил давления по циркуляции раствора. С помощью заданной плотности $\sigma_1(x)$ тепловых стоков учитывается тепловая энергия, которая расходуется на подогрев разбуренной породы до температуры бурового раствора, на подогрев льда до температуры плавления, на плавление льда и на подогрев талой воды до температуры бурового раствора.

Дифференциальные уравнения относительно температур $T_0(x)$ и $T_1(x)$ бурового раствора соответственно в нисходящем и восходящем потоках получим путем составления уравнений теплового баланса. При этом считаем, что стенка пробуренной скважины теплоизолирована от окружающей ММП. Поэтому вывод дифференциальных уравнений делается при условии, что теплопередача от восходящего потока бурового раствора в окружающую породу отсутствует. Рассмотрим на рис. 1 слой $S(x, x + \Delta x)$. В нисходящем потоке сечение x будет входным, а сечение $x + \Delta x$ – выходным из слоя сечением. Для восходящего потока наоборот, сечение $x + \Delta x$ – входное, а сечение x – выходное из слоя S .

Количество теплоты Q_1 (Дж), вносимой нисходящим потоком бурового раствора в слой $S(x, x + \Delta x)$ за зафиксированный отрезок времени Δt равно $Q_1 = T_0(x)q_0\Delta t c_{0p}$. Количество теплоты Q_2 , вырабатываемой сторонними тепловыми источниками в слое $S(x, x + \Delta x)$ буровой колонны за зафиксированный отрезок времени Δt , равно $Q_2 = \sigma_0(x)\Delta t\Delta x$. Количество тепла, передаваемого от нисходящего потока бурового раствора к восходящему потоку, осуществляется путем теплового контакта потоков через стенку буровой трубы. Уравнение теплопередачи при контакте тел с разными температурами определяется на основании известного закона Ньютона – Рихмана в виде $Q_3 = \alpha\pi D_0\Delta x\Delta t[T_0(x) - T_1(x)]$.

Разность $\Delta Q = (Q_1 + Q_2) - Q_3$ между поступающим за время Δt в слой S теплом $Q_1 + Q_2$ и выходящим из него теплом Q_3 идет на изменение температуры раствора со значения $T_0(x)$ до значения $T_0(x + \Delta x)$. Таким образом, из слоя $S(x, x + \Delta x)$ буровой раствор выносит тепло, равное $Q_4 = T_0(x + \Delta x)q_0\Delta t c_{0p}$.

Уравнение теплового баланса $Q_1 + Q_2 - Q_3 = Q_4$ после алгебраических преобразований и перехода к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$, примет вид дифференциального уравнения

$$q_0 c_{0p} \frac{dT_0(x)}{dx} = \sigma_0(x) - \alpha\pi D_0 [T_0(x) - T_1(x)]. \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса для восходящего потока бурового раствора составляется аналогично: $\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 - \dot{Q}_3 = \dot{Q}_4$, где \dot{Q}_1 – тепло на входе в слой S , \dot{Q}_2 – тепло, поступающее в слой S от нисходящего потока, \dot{Q}_3 – тепло, отбираемое из слоя S тепловыми потоками, \dot{Q}_4 – тепло на выходе из слоя S . Отсюда после алгебраических преобразований и предельного перехода при $\Delta x \rightarrow 0$ получаем дифференциальное уравнение

$$q_1 c_{1p} \frac{dT_1(x)}{dx} = \sigma_1(x) - \alpha\pi D_0 [T_0(x) - T_1(x)]. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) определяют систему дифференциальных уравнений, описывающую тепловое взаимодействие нисходящего и восходящего потоков бурового раствора при условии, что стенка разбуренной скважины не передает тепла от восходящего потока бурового раствора в окружающую ММП.

Вычитая из уравнения (1) уравнение (2), получим равенство

$$q_0 c_{0p} \frac{dT_0(x)}{dx} - q_1 c_{1p} \frac{dT_1(x)}{dx} = \sigma_0(x) - \sigma_1(x),$$

интегрируя которое найдем первый интеграл системы уравнений (1), (2):

$$q_0 c_{0p} T_0(x) - q_1 c_{1p} T_1(x) = \int_0^x [\sigma_0(z) - \sigma_1(z)] dz + \tilde{C}_1, \quad (3)$$

где \tilde{C}_1 – произвольная постоянная. Первый интеграл (3) позволяет исключить в системе (1), (2) одну из функций и свести задачу к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения относительно второй неизвестной функции. Например, исключая функцию $T_1(x)$, относительно функции $T_0(x)$ получим дифференциальное уравнение

$$q_0 c_{0p} \frac{dT_0(x)}{dx} + \alpha \pi D_0 (1 - \beta) T_0(x) = \sigma_0(x) - \frac{\alpha \pi D_0}{q_1 c_{1p}} \int_0^x [\sigma_0(z) - \sigma_1(z)] dz + C_1, \quad (4)$$

где

$$\beta = \frac{q_0 c_{0p}}{q_1 c_{1p}}, \quad C_1 = -\frac{\alpha \pi D_0}{q_1 c_{1p}} \tilde{C}_1.$$

Интегрирование дифференциального уравнения (4) приводит к следующему выражению для распределения температуры нисходящего потока:

$$T_0(x) = \frac{C_1}{q_0 c_{0p} k} (1 - e^{-kx}) + C_2 e^{-kx} + \frac{e^{-kx}}{q_0 c_{0p}} \left\{ \int_0^x e^{kz} \sigma_0(z) dz - \frac{\alpha \pi D_0}{q_1 c_{1p}} \int_0^x e^{kz} dz \int_0^z [\sigma_0(\tau) - \sigma_1(\tau)] d\tau \right\},$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные,

$$k = \frac{\alpha \pi D_0}{q_0 c_{0p}} (1 - \beta).$$

Температура $T_1(x)$ восходящего потока бурового раствора в воображаемой скважине с теплоизолированной от ММП боковой стенкой по найденной температуре $T_0(x)$ вычисляется при помощи интеграла (3). Произвольные постоянные C_1 , C_2 в формулах распределения температур $T_0(x)$ и $T_1(x)$ находятся из следующих граничных условий. В точке $x = 0$ задается температура $T_{вх}$ входящего в скважину потока бурового раствора, а в точке расположения долота $x = l$ задается равенство температур нисходящего и восходящего потоков: $T_0|_{x=0} = T_0(0) = T_{вх}$ и $T_0(l) = T_1(l)$.

После того, как температура $T_1(x)$ восходящего потока бурового раствора в воображаемой скважине с теплоизолированной боковой стенкой будет найдена, приступаем к расчету методом аппроксимации температуры $T_{11}(x)$ в восходящем потоке бурового раствора для реальной скважины. Для этого вначале по найденной температуре $T_1(x)$ вычисляем температуру $T_{вх}^*$ бурового раствора на выходе из скважины, которая была бы в условиях термостатического теплообмена $T_{вх}^* = T_1(0)$. Затем по фактическому значению температуры $T_{вх}$ бурового раствора на выходе и теоретическому значению $T_{вх}^*$ вычисляем переменный поправочный коэффициент

$$\zeta(x) = \frac{T_{вх}}{T_{вх}^*} + \left(1 - \frac{T_{вх}}{T_{вх}^*} \right) \frac{x}{l}. \quad (5)$$

Значение коэффициента $\zeta(x)$ на выходе из скважины равно, согласно (5), отношению температур $T_{\text{вых}}/T_{\text{вых}}^*$, а в точке $x = l$ расположения бурового долота равно единице. Во всех же промежуточных точках значения поправочного коэффициента $\zeta(x)$ по крайним значениям вычисляются методом линейной аппроксимации. Приближенное к фактическому распределение температуры $T_{11}(x)$ по температуре $T_1(x)$ и поправочному коэффициенту $\zeta(x)$ вычисляем по формуле

$$T_{11}(x) = \zeta(x)T_1(x). \quad (6)$$

Качественные графики распределения температур $T_0(x)$, $T_1(x)$ и $T_{11}(x)$, полученных из системы дифференциальных уравнений (1), (2) и формулы (6) в конкретном тестовом примере, выше были приведены на рис. 2.

Расчет радиусов протаивания ММП вокруг строящихся скважин по рассчитанным температурам $T_1(x)$ и $T_{11}(x)$ осуществляется по методике, ранее опубликованной авторами в работе [1].

Список литературы

1. Гасумов Р. А., Кондренко О. С., Толпаев В. А. Расчет изотермического фронта протаивания многолетнемерзлой породы по данным, замеряемым при проводке скважины // НТЖ «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». №2, 2011. С. 37–41.

Рукопись поступила в редакцию 18 апреля 2011 г.