

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.24

А.П. СЕМЁНОВА, В.П. ПИМЕНОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ БУРЕНИИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Разработана численная модель тепловых процессов в бурящейся скважине и в окружающих ее мерзлых породах. Рассмотрено влияние вечной мерзлоты на распределение температуры в скважине и формации во время бурения и на скорость восстановления температурного поля после завершения бурения. Построены зависимости радиуса протаивания горных пород от реологии бурового раствора, его расхода и температуры на входе в скважину, а также время бурения.

При воздействии теплого бурового раствора на мерзлые породы стенок скважины лед, содержащийся в порах, начинает таять, т. е. происходит фазовый переход лед—вода. Задача фазового перехода, так называемая задача Стефана, в цилиндрической геометрии аналитического решения не имеет. Приближенные модели для расчета поля температур в мерзлых породах вблизи бурящейся скважины описаны в [1–3, 5, 7], однако они не позволяют учесть влияние на мерзлые породы реальных пространственно-временных вариаций температуры, зависящих от расхода и свойств бурового раствора, скорости бурения и т. д. Авторы разработали алгоритмы численного моделирования тепловых процессов, связанных с бурением мерзлых пород, и показали влияние различных факторов на поле температур и радиус протаивания мерзлых пород.

Основные уравнения

В работе используются одномерная модель теплообмена в скважине, где определяются средние температуры в буровой трубе и кольцевом зазоре, и двумерная модель теплообмена в горном массиве. Предполагается, что тепловые потоки в массиве в вертикальном направлении малы по сравнению с потоками тепла в радиальном направлении, поэтому рассматривается ряд одномерных радиальных профилей по всей длине скважины. Уравнения теплопереноса в скважине и массиве, использованные в данной модели, а также методика расчета описаны в [4].

Таяние мерзлых пород моделировалось с использованием приближенного метода, аналогичного рассмотренному в [5]. Предполагалось, что в интервале температур ( $T^*$  — температура таяния воды при пластовых условиях)

$$T^* - \frac{\delta T}{2} < T < T^* + \frac{\delta T}{2} \quad (1)$$

мерзлые породы имеют повышенную удельную теплоемкость  $c^*$ , которая рассчитывается исходя из баланса энергии:

$$L \cdot \rho_{ice} \cdot \phi = c^* \cdot \delta T \cdot \rho_{perm}, \quad (2)$$

где  $\rho_{perm}$  и  $\rho_{ice}$  — плотности мерзлых пород и льда соответственно,  $\phi$  — пористость пород,  $L$  — скрытая теплота плавления льда. Интервал температур  $\delta T$ , в котором породы имеют повышенную теплоемкость  $c^*$ , с одной стороны, должен быть достаточно малым, чтобы корректно моделировать фазовый переход; с другой стороны, он должен включать несколько расчетных точек. Расчеты показывают, что растепление мерзлых пород вблизи скважины с удовлетворительной точностью моделируется при  $\delta T \approx 1$  К и шагом расчетной сетки 0,5 см.

Описанный выше метод для случая плоской геометрии успешно протестирован с помощью аналитического решения [1]. Для случая цилиндрической геометрии этот метод сравнивался с результатами прямого решения задачи Стефана [6], который предполагает наличие подвижной границы фазового перехода  $X(t)$  и расчет температуры в двух областях:

$$C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 \leq r \leq X(t), \quad (3)$$

$$C_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad r \geq X(t), \quad (4)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — объемные теплоемкости,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — теплопроводности твердой и жидкой фаз. Движение границы фазового перехода описывается следующим уравнением:

$$W_1|_{r=X(t)} - W_2|_{r=X(t)} = L \frac{\partial X(t, r)}{\partial t}, \quad (5)$$

где  $W_2$  и  $W_1$  — тепловые потоки на границе раздела фаз. Задача (3)–(5) численно решается с помощью метода итераций и требует специального выбора шага по времени, что значительно увеличивает время расчета.

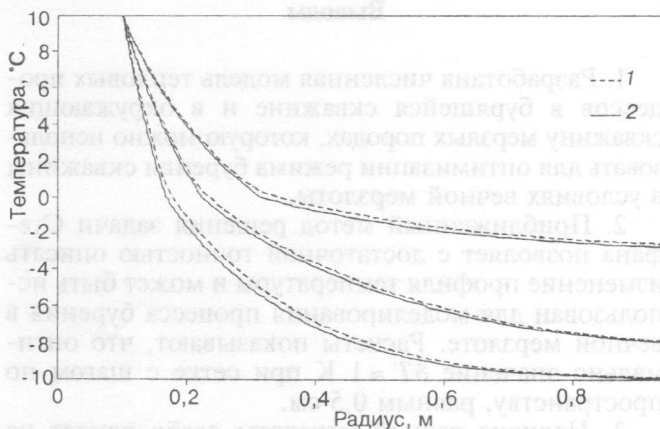


Рис. 1. Радиальные профили температуры, рассчитанные для 15,7; 65,9; 213,6 ч теплового воздействия соответственно: 1 — приближенный, 2 — прямой методы

На рис. 1 представлены результаты решения задачи для цилиндрической геометрии прямым и приближенным методами. Расчеты были сделаны для следующих параметров: продолжительность нагрева 15,7, 65,9 и 213,6 ч, начальная температура пород  $T_f$  -10 °С, температура стенок цилиндра  $T_m$  10 °С,  $\phi$  1,  $L$  3,34 · 10<sup>5</sup> Дж/кг,  $c_f$  1000 Дж/кг·К,  $\rho_f$  3000 кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_f$  3 Вт/м·К. Из рис. 1 видно, что результаты расчетов практически совпадают.

В отличие от прямого метода решения задачи Стефана приближенный метод не влияет на сложность алгоритма и время моделирования процесса бурения, поэтому моделирование бурения мерзлых пород проводилось с помощью приближенного метода.

### Примеры численного моделирования

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2–4. Параметры расчета следующие: температура на поверхности  $T_0$  -10 °С, геотермический градиент температуры  $G$  0,02167 К/м, толщина слоя вечной мерзлоты 460 м, расход бурового раствора  $G$  10 кг/с, температура бурового раствора, закачиваемого в скважину,  $T_{in}$  10 °С. На рис. 2 по-

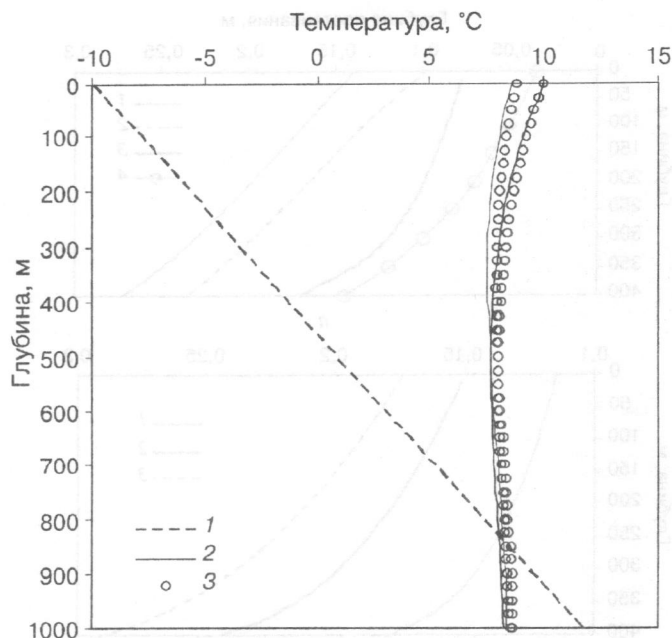


Рис. 2. Профили температуры в буровой трубе и кольцевом зазоре во время бурения: 1 — геотермическая температура; 2 — с учетом, 3 — без учета влияния вечной мерзлоты

казана температура в скважине во время бурения со слоем вечной мерзлоты и без него. Различия в температурах между двумя случаями практически не заметны.

На рис. 3 отражены радиальные профили температуры на стенке скважины на различных глубинах в зависимости от времени, прошедшего после завершения бурения. Мерзлые толщи выделяются характерными изломами температурных профилей в зоне смены фаз. Согласно рис. 3, первые 50 ч восстановление температуры на всем протяжении мерзлых пород идет практически одинаково, при приближении к температуре таяния льда, последующие 60–70 ч температуры близки к нулю и лишь затем они начинают приближаться к своим первоначальным значениям.

На рис. 4 показана зависимость глубины протаивания мерзлых пород от расстояния до поверхности Земли для различных условий бурения. На рис. 4, а представлена зависимость глубины протаивания от реологии бурового раствора для разных температур бурового раствора на входе в скважину

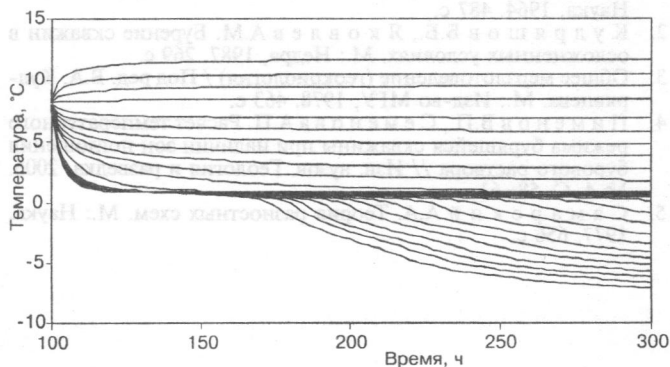


Рис. 3. Радиальные профили температуры на стенке скважины на различных глубинах в зависимости от времени, прошедшего после завершения бурения

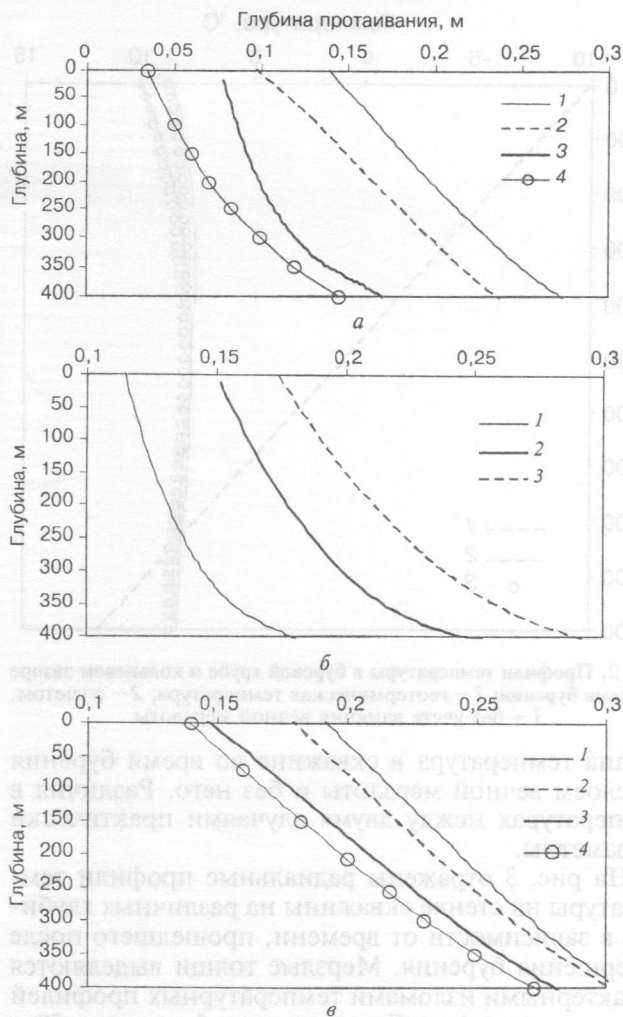


Рис. 4. Глубина протаивания мерзлых пород: а — для бурения с вязким буровым раствором (1, 2) и водой (3, 4): 1, 3 —  $T_{in} 5^\circ\text{C}$ ,  $G 10 \text{ кг/с}$ ; 2, 4 —  $T_{in} 1^\circ\text{C}$ ,  $G 40 \text{ кг/с}$ ; б — для  $T_{in} 10^\circ\text{C}$ ,  $G 20 \text{ кг/с}$  и для разного времени бурения с водой: 1 — 25, 2 — 50, 3 — 75 ч; в — для бурения с вязким буровым раствором: 1 —  $T_{in} 10^\circ\text{C}$ ,  $G 20 \text{ кг/с}$ , 2 —  $T_{in} 10^\circ\text{C}$ ,  $G 10 \text{ кг/с}$ , 3 —  $T_{in} 5^\circ\text{C}$ ,  $G 20 \text{ кг/с}$ , 4 —  $T_{in} 5^\circ\text{C}$ ,  $G 10 \text{ кг/с}$

$T_{in}$  и расхода  $G$ . Расчеты производились для двух буровых растворов: воды и раствора с вязкостью

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карслоу Г., Егерд. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
2. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. М.: Недра, 1987. 269 с.
3. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978. 463 с.
4. Пименов В.П., Семенова А.П. Расчет температурного режима бурящейся скважины при наличии зон поглощения бурового раствора // Изв. вузов. Геология и разведка. 2005. № 4. С. 58–61.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

$10^{-2}$  Пас и сдвиговым напряжением 10 Па. На рис. 4, б приведено влияние скорости бурения на глубину протаивания пород. В качестве бурового флюида использовалась вода. На рис. 4, в отражено влияние температуры  $T_{in}$  и расхода  $G$  на глубину протаивания. Из рисунков ясно, что существует сложная зависимость между глубиной протаивания и рядом факторов, таких как температура пород, время воздействия бурового раствора на породы, реология и температура бурового раствора. Для данных параметров наименьшая глубина протаивания получена при использовании воды в качестве бурового раствора (рис. 4, а), при уменьшении времени воздействия на мерзлую породу (рис. 4, б), а также при уменьшении расхода и температуры бурового раствора на входе в скважину (рис. 4, в).

#### Выводы

1. Разработана численная модель тепловых процессов в бурящейся скважине и в окружающих скважину мерзлых породах, которую можно использовать для оптимизации режима бурения скважины в условиях вечной мерзлоты.

2. Приближенный метод решения задачи Стефана позволяет с достаточной точностью описать изменение профиля температуры и может быть использован для моделирования процесса бурения в вечной мерзлоте. Расчеты показывают, что оптимально значение  $\delta T \approx 1 \text{ K}$  при сетке с шагом по пространству, равным 0,5 см.

3. Наличие вечной мерзлоты слабо влияет на температуру бурового раствора в скважине во время процессов бурения и промывки, в то же время оказывает значительное влияние на скорость восстановления температуры во время остановки скважины и на радиальное распределение температуры в массиве.

Работа выполнена в рамках контракта и в сотрудничестве с международной компанией Schlumberger, работающей в нефтегазовой промышленности.

Российский государственный геологоразведочный университет  
Рецензент — А.Н. Чернов