

## Обратные и некорректные задачи многолетней мерзлоты при потеплении климата

Пермяков П.П., Малышев А.В., Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Винокурова Т.А., Попов Г.Г.

ИФТПС СО РАН, Якутск, Россия

permyakov2005@mail.ru

В настоящее время, в связи с потеплением климата, в криолитозоне остро стоят вопросы, которые связаны с обратными и некорректными задачами окружающей среды. Сезонное промерзание-протаивание грунтов, устойчивость и сохранность инженерных сооружений создают новые проблемы в этих условиях. Процесс протаивания многолетней мерзлоты, миграция воды и деформация грунта описывается системой уравнений [1], которая замыкается уравнением количества незамерзшей воды  $W_{\text{нв}} = W_{\text{нв}}(T, W)$ . При численном решении этой системы в криолитозоне столкнулись с неопределенностью теплофизических и массообменных характеристик промерзающих-протаивающих грунтов, а также с проблемой задания граничных условий влажности на фронте фазового перехода [2]. Исходные параметры (теплофизические, массообменные и напряженно-деформационные) зависят от состояния поровой воды грунта, связь осуществляется через функцию количества незамерзшей воды. Функция от температуры описывает реальный процесс промерзания-протаивания грунта, которая определяется параметрами дисперсности, засоленности, загрязненности и давления грунта. Указанные параметры имеют вид: теплофизические:  $\lambda(T, w, \rho) = \lambda_m - (\lambda_m - \lambda_t) \frac{W_{\text{нв}}(T) - w_{\text{пс}}}{w - w_{\text{пс}}}$ ,  $c = c_{\text{эф}} = c_{\text{ск}} + c_{\text{л}} w + (c_{\text{в}} - c_{\text{л}}) W_{\text{нв}}(T) + L \frac{\partial W_{\text{нв}}(T)}{\partial T}$ ; массообменные:  $k_{\text{ф}}(T, P, w_{\text{в}}, w_{\text{л}}) = k_{\text{ф}, \text{т}}(T, P, W_{\text{в}}(T)) e^{b \cdot w_{\text{л}}}$ ; параметры напряжения:  $\mu_1(T) = \frac{E(T)}{2(1+v)}$ ,  $\mu_2(T) = \frac{vE(T)}{(1+v)(1-2v)}$ ,  $E(T) = \frac{E_{\text{л}}(\bar{w} - W_{\text{нв}}(T)) \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{л}}} + E_{\text{гр}}}{(\bar{w} - W_{\text{нв}}(T)) \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{л}}} + 1}$ , где  $\mu_1(T), \mu_2(T)$  – параметры Ламе;  $E(T)$  – модуль упругости;  $v$  – коэффициент Пуассона;  $\rho_{\text{гр}}, \rho_{\text{л}}, \rho_{\text{в}}$  – плотность грунта, льда, воды. Восстановление функции количества незамерзшей воды и коэффициента диффузии приведены в работе [1].

При потеплении климата с учетом и без учета инсоляции усиливается процесс протаивания грунта, увеличивается подвижность незамерзшей воды, который сопровождается пучением и просадкой полотна железной дороги. Рассматриваются два сценария: в первом без изменения среднегодовой температуры воздуха равной минус  $10^\circ\text{C}$  и втором – при потеплении климата на  $4^\circ\text{C}$ . В первом случае наблюдается процесс пучения полотна, что связано со стабилизацией температурного режима и многогодичной миграцией влаги к фронту промерзания. Во втором случае в первые годы (10 лет) проходит просадка за счет протаивания верхних слоев полотна, а в последующие годы (30 и 50 лет), наоборот, пучение за счет промерзания миграционной воды в нижнем слое. Численным моделированием установлено, что подземный трубопровод дважды в год меняет свое положение в моменты замерзания и оттаивания. Достоверность проверена методом плано-высотного измерения магистрального газопровода на участках со сложными деформациями. При формировании зимнего влажностного поля важную роль играют осенние дожди, которые усиливают подтягивание незамерзшей воды к фронту промерзания и образуют избыточное давление. За счет тепла, которое аккумулировалось в летние месяцы, в нижней части деятельного слоя грунта идет процесс протаивания. Совместное воздействие миграционных и паводковых вод формирует зону повышенной влажности, что на фоне низких температур приводит к термоабразии, размыву и разрушению берегов, негативно воздействуя на ПТС. Верификация параметров модели, используя современные методы решения некорректных задач, расширяет область численного расчета, повышает достоверность и точность моделирования [1, 2, 3].

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №23-61-10032.*

### Список литературы

1. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: СО РАН, 2023.
2. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука, 1989.
3. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988.