

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЕПЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Н.А. Ваганова, М.Ю. Филимонов

Институт математики и механики УрО РАН, Екатеринбург

NUMERICAL SIMULATION OF PERMAFROST DEFROSTING AS A RESULT OF EXPLOITATION OF OIL WELLS

N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov

Institute of Mathematics and Mechanics UrB RAS, Ekaterinburg

Zone of permafrost takes 65% of Russian territory and is extremely important for our economy, because about 93% of Russian natural gas and 75% of oil is produced here. When operating the oil wells an important task is to reduce the influence of heat on frozen soil. To study this process a 3D model of thermal interaction in well-ground is designed, taking into account a number of physical factors which is affected on distribution of heat. Based on developed software, a series of computations of permafrost defrosting in the area of well-ground is carried out, taking into account an actual thermal characteristics of soils.

Введение

Обустройство и эксплуатация нефтяных скважин в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) имеет ряд особенностей. Средняя толщина мерзлых пород меняется в пределах от 10 до 800 м. Слагающие ММП породы имеют различные физико-химические свойства, которые могут изменяться по всем направлениям. В летнее время, в силу положительных температур воздуха и солнечного излучения, происходит сезонное оттаивание верхнего слоя ММП, в зимнее время наблюдается обратный процесс. Установлено, что хозяйственная деятельность человека приводит к растеплению ММП. Например, в Норильске средняя температура вечной мерзлоты на глубине 10–12 м (как показали и наши расчеты, на такой глубине не сказываются сезонные колебания температуры) до застройки составляла -3°C . Натурные наблюдения мерзлотной лаборатории Норильского комбината в глубокой скважине в центре Норильска показали, что в интервале глубин 20–60 м температура ММП повысилась за период с 1955 по 1985 годы на $0,5\text{--}1^{\circ}\text{C}$. Более 75% всех зданий и сооружений в зоне вечной мерзлоты построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Добыча нефти также оказывает существенное влияние на ММП, т.к. горячая нефть, нагревающая трубу в скважине, сезонное оттаивание ММП приводят к растеплению грунта вокруг скважины. Во избежание этого, внешнюю поверхность скважины теплоизолируют различными материалами с различными геометрическими и изолирующими характеристиками, а для теплоизоляции земной поверхности используют песок, бетонные плиты, пеноплекс и другие материалы. Проблема уменьшения интенсивности теплового взаимодействия в системе «скважина – ММП» имеет особое значение для решения задач энергосбережения, охраны окружающей среды, безопасности, экономии затрат и повышению эксплуатационной надежности скважин. По данным доклада комиссии экологического надзора до 55 млрд. рублей в год тратится на ремонт инфраструктуры, трубопроводов и скважин, поврежденных в результате изменений в вечной мерзлоте в Западной Сибири. Таким образом, актуальной задачей является построение адекватной математической модели по оценке скорости процесса растепления ММП от добывающих скважин и разработка соответствующего программного обеспечения.

Постановка задачи и математическая модель

При моделировании распространения тепла от добывающей скважины в зоне ММП необходимо учитывать следующие факторы:

- возможный фазовый переход в грунте;
- различные теплофизические параметры грунтов;
- сезонное изменение температуры воздуха;

- конвективный и лучистый теплообмен на поверхности;
- различные теплоизолирующие материалы скважин;
- теплоизоляция поверхности рабочей площадки, на которой бурятся скважины (как правило, это бетонные плиты, песок и пеноплекс);
- реальная инженерная инфраструктура скважины, обеспечивающая ее теплоизоляцию от ММП.

Для моделирования данного процесса распространения тепла была предложена следующая математическая модель. Пусть $T=T(t,x,y,z)$ – распределение температуры в момент времени t , (x,y,z) – точка расчетной области. Основные тепловые потоки, учтенные в модели, представлены на рис. 1.

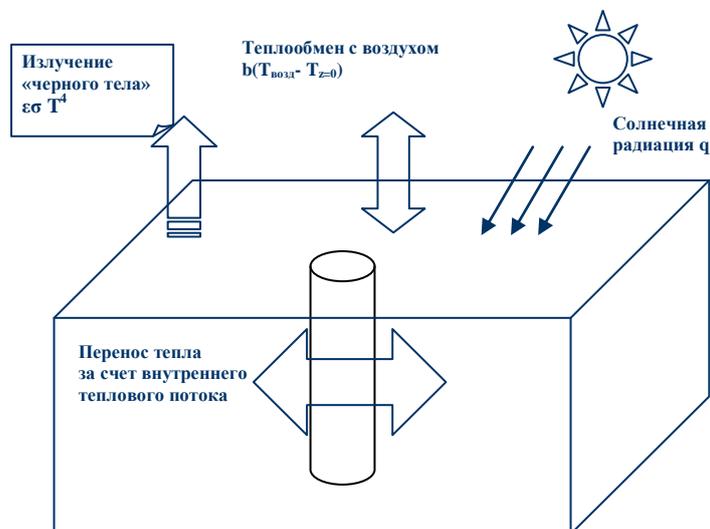


Рис. 1. Основные тепловые потоки.

Расчетная область представляет собой трехмерный параллелепипед, из которого удалена вертикальная цилиндрическая скважина (рис. 2). Оси x и y расположены параллельно поверхности грунта, а ось z – вниз. Область может включать в себя различные элементы, например, различные слои отсыпки поверхности грунта и слои инженерных конструкций, окружающие скважину. В качестве основной математической модели для учета излучения от каждой скважины используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода [1]. При этом теплота фазового превращения вводится с применением δ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре, и не зависит от числа измерений и фаз. Таким образом, моделирование процессов растепления в грунте сводится к решению уравнения

$$\rho \left(c_v(T) + k\delta(T - T^*) \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad } T), \quad (1)$$

где ρ – плотность [кг/м³], T^* – температура фазового перехода, $c_v(T) = \begin{cases} c_1, & \text{при } T < T^* \\ c_2, & \text{при } T > T^* \end{cases}$ – удельная

теплоемкость [Дж/кг.К], $\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{при } T < T^* \\ \lambda_2, & \text{при } T > T^* \end{cases}$ – коэффициент теплопроводности [Вт/м К], k –

теплоемкость фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака. Будем предполагать, что значения коэффициентов, входящих в уравнение (1), могут меняться в различных точках расчетной области (неоднородность грунта по слоям и возможная теплоизоляция поверхности скважины).

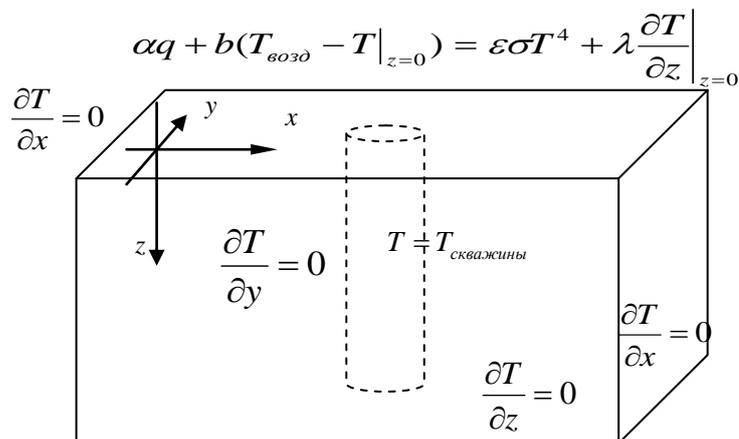


Рис. 2. Расчетная область и граничные условия

В качестве граничного условия на поверхности грунта – основной зоне формирования естественных тепловых полей – используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднемесячной температуры воздуха и мощности солнечного излучения (в основном в летние месяцы). На поверхности скважины задается постоянная температура – температура скважины (нефти). На нижней и боковых гранях параллелепипеда (рис. 2) – условие, что поток тепла равен нулю, кроме того, может быть задано условие постоянства температуры. Таким образом, требуется решить уравнение (1) в расчетной области (рис. 2) с учетом начальных

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

и граничных условий

$$\alpha q + b(T_{возд} - T|_{z=0}) = \epsilon \sigma T^4 + \lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} \quad (3)$$

Численная методика и результаты расчетов

Для поставленной задачи был разработан численный алгоритм и комплекс прикладных программ, позволяющий в сложной трехмерной области, определяемой инженерными параметрами скважины, проводить расчет растепления грунта в течение эксплуатации добывающей скважины. Например, удалось провести расчеты по расчету растепления ММП с учетом оболочки, покрывающей скважину, которая имеет толщину всего 2 мм, в то время как расчетная область представляет собой куб со стороной 50 м. Размер расчетной области по горизонтали подбирается таким образом, чтобы влияние внешней границы не оказывало существенного влияния на распределение температуры. При расчетах используется регулярная ортогональная сетка, сгущающаяся в областях источников тепла (к внутренней границе – скважине и к дневной поверхности). Поскольку теплопроводящие свойства рассчитываемых материалов и грунтов достаточно «медленные», то есть коэффициенты температуропроводности порядка $10^{-6} - 10^{-7}$, то для сходимости разностного метода необходимо использование априорно сгущающихся сеток в пограничных слоях. Для расчетов используется метод расщепления по пространственным переменным [2] и экономичная неявная локально-одномерная аддитивная схема с целыми шагами. Сходимость и устойчивость этой схемы на основе суммарной аппроксимации показана в [3] и дает оценку точности $O(\tau + |h|^2)$ на равномерной сетке и $O(\tau + |h|)$ на неравномерной сетке, где τ и h – шаги по времени и пространству соответственно.

Приведем некоторые результаты расчетов на основе реальных данных о структуре ММП и инженерной конструкции нефтедобывающей скважины на одном из месторождений Западной Сибири.

Рассмотрим одиночную скважину, расположенную в неоднородном грунте, основные составляющие породы которого представлены в таблице 1. Грунт имеет начальную температуру -3°C . На поверхности грунта – два метра отсыпки из песка (1.7 м.) и строительного цемента (0.3 м.). Скважина радиусом 8.4 см. расположена в центре расчетной области размером 50 м. в ширину и длину, 40 м. в глубину. Скважина заполнена нефтью температурой 35°C и имеет два слоя изоляции: кольцо строительного цемента, толщиной 3.85 см. Толщина теплоизоляции кольца скважины составляет 32.6 см. на глубине до 25 м. и 13.9 см. глубже 25 м. Теплофизические параметры изоляции скважины представлены в таблице 2. Будем предполагать, что материалы отсыпки и цементы достаточно сухие и не претерпевают фазового перехода, а таяние грунта происходит при 0°C .

Таблица 1. Теплофизические параметры грунта.

Породы грунта	Плотность, т/м^3		Теплопроводность, Вт/(м К)		Уд. теплоемкость, кДж/(кг К)		Уд. тепл. таяния, кДж/кг
	Мерзлый	Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый	Талый	
Песок	1.96	1.96	2.15	1.77	0.964	1.329	60.437
Суглинок	1.97	1.97	1.46	1.36	1.168	1.527	71.957
Супесь	2.24	2.24	1.92	1.79	1.006	1.284	50.579

Таблица 2. Материалы изоляции скважины.

Материал	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт/(м К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг К)
Строительный цемент	2500.0	1.69	0.84
Изолирующий цемент	960.0	0.21	0.84

На рис. 3 представлен рассчитанный фронт таяния грунта (изотермы -0.5°C , 0°C , 0.5°C) через 10 лет после начала эксплуатации скважины. Необходимо заметить, что средняя фоновая температура на границе расчетной области увеличилась с -3°C до -1.53°C .

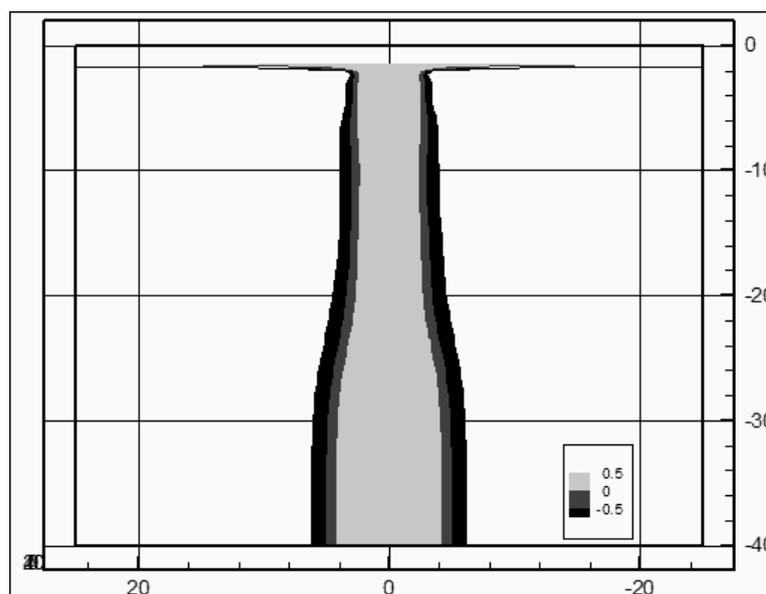


Рис. 3. Общий вид температурного поля от теплоизолированной скважины после 10 лет эксплуатации.

На рисунке 4 показано продвижение фронта таяния грунта в течение 10 лет. Все данные приведены для августа – месяца наибольшего сезонного протаивания грунта у поверхности.

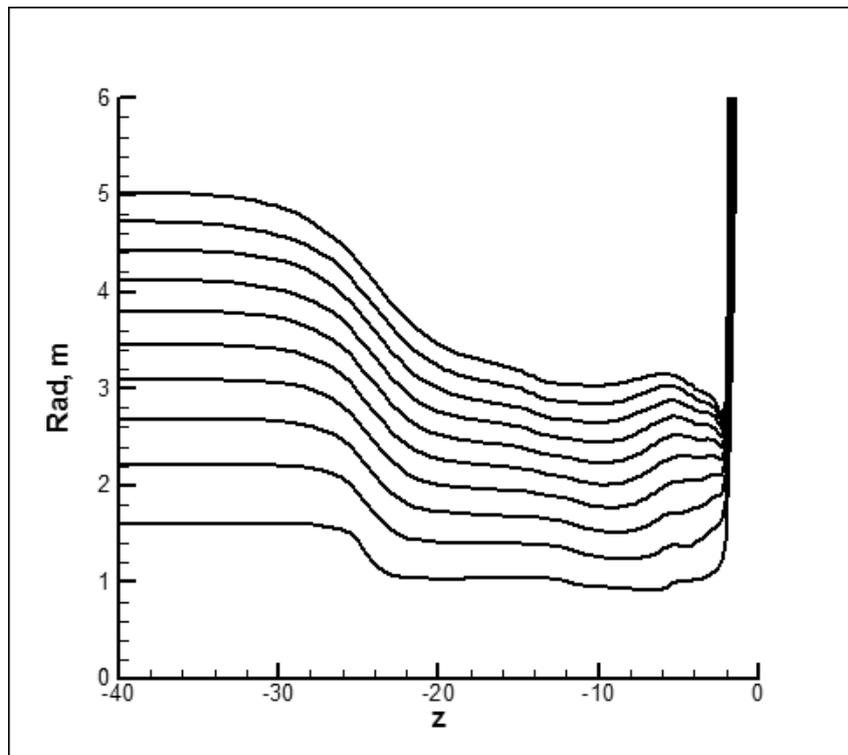


Рис. 4. Движение фронта таяния ММП (изотерма 0°C) от скважины в течение 10 лет.

Выводы

На основе новой математической модели разработан комплекс программ для численного моделирования тепловых полей в приповерхностном слое ММП глубиной до 150 м. (глубина определяется мощностью ЭВМ и числом узлов сетки). В отличие от работ других авторов (например, [4]) в представленной модели учитываются существенные физические факторы, влияющие на процесс растепления ММП, такие как: неоднородность ММП, теплообмен поверхности грунта с воздухом, в том числе и за счет потерь тепла на излучение, годовой климатический цикл (среднемесячная температура воздуха и интенсивность потока солнечной энергии). Разработанный комплекс программ позволяет проводить расчеты для расчетной области, состоящей из различных грунтов. Кроме того, возможно проведение расчетов для нескольких скважин в одной расчетной области. Результаты численного моделирования позволяют делать долговременные прогнозы по растеплению ММП и давать рекомендации по теплоизоляции и размещению скважин на рабочей площадке.

Работа поддержана грантами РФФИ-УРАЛ № 10-08-96014, программой поддержки фундаментальных исследований Президиума РАН и программой интеграционных проектов между УрО РАН, СО РАН и ДВО РАН.

Список литературы

1. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана. ЖВМиМФ. Т. 5. № 5. 1965. С. 816-827.
2. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981.
3. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС. 2003.
4. Горелик Я.Б., Шабров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин. Криосфера Земли. Т. XII. № 1. С. 59-65.