

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ
МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕВЕРНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Ваганова Н.А., Васев П.А., Гусарова В.В., Игумнов С.Т., Филимонов М.Ю.

*Институт математики и механики УрО РАН,
Екатеринбург, fmy@imm.uran.ru
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург*

В соответствии с работами [1 – 3] предложена модель для долгосрочного прогнозирования последствий, вызываемых освоением и эксплуатацией нефтегазовых месторождений, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород (ММП), а также и на арктическом шельфе. Разработаны новые методы по моделированию и изучению особенности деградации ММП на кустовых площадках, связанной с распространением трехмерных нестационарных тепловых полей в вечной мерзлоте от различных источников тепла (холода) с учетом климатических изменений, включая и солнечное излучение, а также и с учетом комплексного влияния всех инженерных объектов и технических систем, располагающихся на кустовых площадках северных нефтегазовых месторождений, с оценкой достоверности полученных результатов и корректности исходных моделей. Оптимальное расположение этих объектов на кустовой площадке позволит минимизировать влияние температурных воздействий на ММП, в том числе и за счет термостабилизации грунта, повысит безопасность эксплуатации нефтегазовых месторождений, будет способствовать охране окружающей среды и приведет к значительному сокращению затрат уже на стадии проведения проектных работ.

Новизна приведенных результатов заключена в том, что при моделировании поставленных задач на супер-ЭВМ учитывается максимальное число климатических, физических и техногенных факторов, влияющих на долгосрочные прогнозы, связанные с деградацией ММП от различных инженерных объектов (добывающих и нагнетательных скважин, охлаждающих

устройств, факельных систем и т.п.), размещенных на кустовой площадке. В компьютерной реализации использованы собственные оригинальные методики «привязки» численных алгоритмов к географическим координатам местности, а также климатические базы, разработанные на основе открытых баз NASA, позволяющие существенно сократить задание исходных параметров для созданной облачной среды Wellfrost и облачных технологий проведения расчета.

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 [4]. 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

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

с учетом начального условия

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

где ρ – плотность, кг/м³, T^* – температура фазового перехода,

$$c_v(T) = \begin{cases} c_1, & \text{при } T < T^*, \\ c_2, & \text{при } T > T^*, \end{cases} \quad \text{– удельная теплоемкость, Дж/(кг·К),}$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{при } T < T^*, \\ \lambda_2, & \text{при } T > T^*, \end{cases} \quad \text{– коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),}$$

k – теплоемкость фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака.

Остановимся более подробно на получении краевого условия на поверхности грунта, поскольку условие такого типа редко используется при решении рассматриваемых задач. 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 весенние и летние месяцы). Составим тепловой баланс на поверхности $z = 0$.

Имеем: $q_1 = \alpha q$ – солнечная радиация, ушедшая на нагрев грунта;
 $q_2 = b(T_{air} - T(t, x, y, 0))$ – теплообмен с воздухом;
 $q_3 = \varepsilon \sigma (T^4(t, x, y, 0) - T_{air}^4)$ – излучение «черного тела»;
 $q_4 = -\lambda \partial T / \partial z$ – теплоотдача за счет внутреннего теплового потока.

Баланс потоков $q_1 + q_2 = q_3 + q_4$ дает граничное условие на поверхности:

$$\alpha q + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4) + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (3)$$

На рисунке представлены результаты численных расчетов задачи (1) – (3) по нахождению тепловых полей в ММП от двух теплоизолированных скважин.

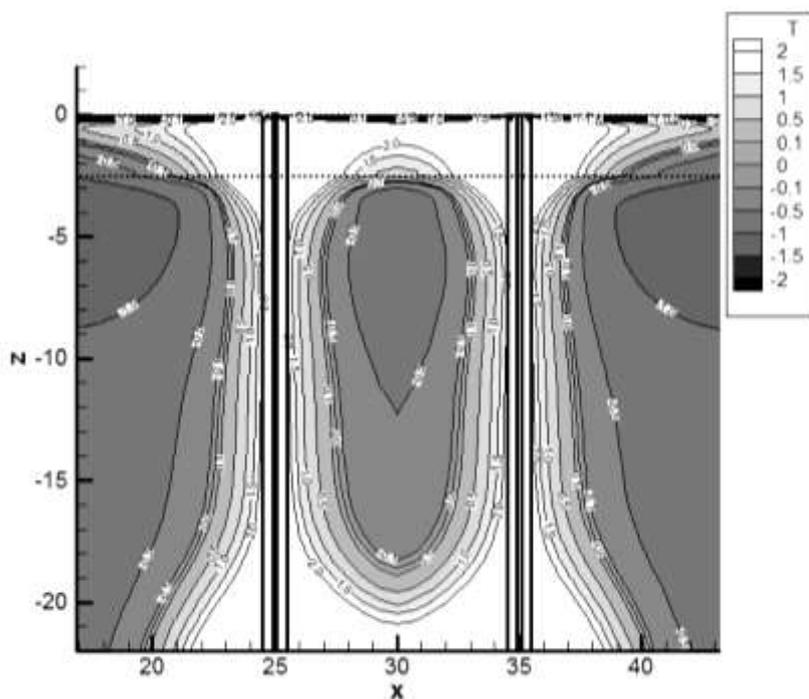


Рисунок – Две изолированные скважины через 5 лет эксплуатации

Эти расчеты также могут проводиться с помощью облачного интерфейса, используя мобильное устройство (например, мобильный телефон с Интернетом), связанное через сервер с супер-ЭВМ, на которой размещен комплекс программ Wellfrost.

В результате удаленных расчетов можно получить необходимый набор данных для долгосрочного прогнозирования изменений в вечной мерзлоте, к которому также имеется доступ с мобильного устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 13-01-00800), программами УрО РАН «Арктика» 12-1-4-005, 12-С-1-1001, 12-Р-1-1009.

Список литературы

1. Filimonov M.Y., Vaganova N.A. Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost // Applied Mathematical Sciences. 2013. V. 7, № 141-144. P. 7151-7160.
2. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13, № 4. С. 37-42.
3. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of thermal fields in the permafrost with seasonal cooling devices // Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference IPC. 2012. V. 4. P. 133-141.
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.