

УДК 622.243:551.345

**РАСЧЕТНЫЙ АЛГОРИТМ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ
ПОРОДАМИ**

Н. Х. Искандаров, Ф.А. Агзамов

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

**CALCULATION ALGORITHM OF THERMAL INTERACTION OF
OIL WELL WITH PERENNIALY FROZEN ROCKS**

N.H. Iskandarov, F.A. Agzamov

Ufa State Petroleum Technological University

E-mail: faritag@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается расчетный метод процесса теплофизического взаимодействия в системе «скважина - мерзлая толща» с учетом физических и геологических факторов. Для изучения этого вопроса были произведены расчеты, позволяющие оценить влияние коэффициента теплоотдачи на величину радиуса протаивания пород вокруг скважины при фиксированной температуре теплового воздействия.

Разработанная модель позволяет проводить расчеты для расчетной области, состоящей из различных составляющих. Результаты численного моделирования позволяют делать долговременные прогнозы по растеплению ММП и обосновать рекомендации по теплоизоляции скважины.

Abstract. The article discusses the calculation methods of thermo-physical interaction processes in the system "permafrost-well" in view of the physical and geological factors of oil wells. To explore these questions,

calculations were made to determine the effect of the heat transfer coefficient on the value of the radius of the thawing of rocks around the well at a fixed temperature heat.

The developed model allows calculations for computational domain consisting of various components. Numerical simulation results allow us to make long-term forecasts by thawing perennially frozen rocks and make recommendations by well insulation.

Ключевые слова: конечно-элементная разность, многолетнемерзлая порода, теплообмен, фазовый переход, нестационарная задача Стефана, метод энтальпии.

Key words: finite - element difference, perennially frozen rocks, heat transfer, phase transition, non-stationary Stefan problem, enthalpy method.

Для повышения надежности эксплуатации скважин в мерзлых породах требуются расчетные методы оценки конструктивных и технологических параметров проектирования и эксплуатации этих сооружений. Технологические режимы строительства и эксплуатации скважин протекают при сопряженном термомеханическом и массообменном взаимодействии и взаимовлиянии компонентов системы «скважина-порода» друг на друга. Особенности перераспределения тепла, массы и прочности приводят к комплексу специфических для криолитозоны осложнений при эксплуатации скважин

Образование твердой фазы в поровом пространстве пород меняет их физико-механические, теплофизические и массообменные характеристики [4], что в свою очередь, приводит к изменениям процессов тепломассообмена и перераспределению напряженно-деформируемого состояния при взаимодействии пород с сооружениями в системе скважина-

порода [1]. Температурный режим эксплуатации скважины может протекать с переходами через температуру плавления льда в элементах системы скважина-порода, поэтому устойчивость стенок ствола является наиболее сложной как по своему физическому содержанию, так и по ее количественному описанию [2]. Применение при строительстве и эксплуатации скважин специальных тампонажных материалов, а также использование эффективной теплоизоляции их конструкций позволяет уменьшить радиус зоны оттаивания мерзлых пород в заколонном пространстве. При строительстве и эксплуатации скважин в мерзлых породах фазовый переход поровой влаги может быть косвенным фактором нагружения элементов сооружения. Косвенным он является на стадии протаивания мерзлых пород, контактирующих со скважиной. В этом случае происходят перемещения и обрушения растепленных пород, что приводит к увеличению нагрузок на крепь, и к дополнительным деформациям элементов сооружений. Наиболее растепленной является область пород, примыкающая непосредственно к тепловыводящему сооружению, поэтому в этой области имеет место наибольшее разупрочнение пород и повышение нагрузок.

При численном моделировании процесса протаивания мерзлых пород, как правило, используют предположение о чисто кондуктивной передаче тепла в пористой среде в пределах талой и мерзлой зон. Такое предположение основано на том, что лед занимает поры пласта целиком и в исходном состоянии мерзлая порода имеет нулевую проницаемость, а инфильтрация промывочной жидкости в пределах уже оттаявшей зоны незначительно влияет на величину кондуктивного теплового потока [5].

Классической задачей по расчету теплового потока, сопровождающегося изменением агрегатного состояния вещества, является задача плавления или затвердевания, которая впервые была сформулирована австрийским физиком Йозефом Стефаном в 1889 году.

Поэтому краевые задачи для уравнений с коэффициентами, терпящими разрыв на неизвестных подвижных границах, принято называть задачами типа Стефана. Вещество, рассматриваемое при решении задач данного типа, заполняет положительное полупространство и может находиться в твердом или в жидком состоянии. Если решается задача растепления, то вещество в начальный момент времени находится в твердом состоянии. Если рассматривается задача затвердевания, то вещество находится в жидком состоянии. Для каждой из фаз должно - выполняться уравнение теплопроводности [6]

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} (k(T) \operatorname{grad} T) + f(r, t) \quad (1)$$

где $T=T(r, t)$ — температура в точке с радиус-вектором $r(x_1, \dots, x_p)$ в момент времени t ;

$c(T)$ - коэффициент теплоемкости;

$k(T)$ – коэффициент теплопроводности;

$f(r, t)$ - плотность тепловых источников.

Распространение тепловых потоков рассматривается вдоль радиуса зоны растепления пласта, поэтому $p=1$, а поскольку в вечномерзлых породах отсутствуют внутренние источники тепла, то принимается $f(r, t) = 0$. Тогда получается более простой вид уравнения теплопроводности для одномерного случая

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Одной из отличительных черт задачи Стефана является наличие движущейся поверхности раздела между двумя фазами, на которой происходит поглощение тепла. Положение границы раздела фаз определяется из условия сохранения на этой поверхности постоянной температуры фазового перехода T^* , т.е. $T(r, t) = T^*$. На границе раздела фаз должно выполняться следующее условие:

$$Q_2|_{r=X(t)} - Q_1|_{r=X(t)} = \lambda \frac{\partial X(t, r)}{\partial t} \quad (3)$$

где Q_1 и Q_2 - тепловые потоки со стороны твердой и жидкой фазы соответственно; λ — скрытая теплота фазового перехода; $X(t,r)$ — закон движения границы раздела фаз.

Начальная температура $T_0(r)$ - это температура породы $T(r,t)$ в момент времени $t=0$:

$$T(r,0) = T_0(r) \quad (4)$$

Граничные условия могут быть первого или второго рода. Они задаются следующими выражениями:

для левой границы: для правой границы:

$$T(t,0) = T_2 - \text{первый род}$$

$$T(t,R) = T_1 - \text{первый род}$$

$$\frac{\partial T(t,0)}{\partial r} = Q_2 - \text{второй род} \quad \frac{\partial T(t,R)}{\partial r} = Q_1 - \text{второй род} \quad (5)$$

где T_1 - температура твердой фазы; T_2 - температура жидкой фазы; R - длина исследуемого участка.

Выражения (2) - (4) при учете граничных условий (5) образуют задачу Стефана, которую можно решать численными методами.

В настоящее время в связи с бурным развитием компьютерных технологий основным методом решения физических задач стал численный эксперимент, реализуемый с помощью аналитических или численных методов.

Основное преимущество аналитических алгоритмов состоит в том, что они позволяют найти решение для всех существенных величин как функцию аргументов, известных непосредственно из постановки задачи, а также проследить их внутренние взаимосвязи. Причем решение в этом случае будет непрерывным [7]

Несмотря на универсальный характер численных методов, рост возможностей современных компьютеров и формирование объектно-ориентированных пакетов программ, аналитические методы продолжают

играть важную роль при решении различных научных задач. За счет того, что реализация приближенных аналитических решений не требует больших ресурсов персонального компьютера и наличия соответствующих специалистов, аналитические решения используются для тестирования результатов счета, полученных при реализации численными методами. Использование численных методов в настоящее время практически не накладывает сколь либо существенных ограничений на вид исходной системы уравнений и граничных условий. Они позволяют реализовать не только широкий круг одно-, двух- и трехмерных прямых задач, когда необходимо определить поле потенциала по известной математической модели, но также и обратные задачи, когда по известному полю потенциала определяются коэффициенты, уточняется вид граничных условий, оценивается область интегрирования либо уточняется исходная модель процесса.

Поскольку задачи Стефана относятся к классу нелинейных краевых задач, то наиболее эффективным способом их численного решения являются конечно-разностные методы [8].

В настоящее время самым эффективным и универсальным способом численного решения краевых задач является метод конечных разностей, основанный на применении так называемых «сеточных функций» - функций дискретного аргумента, рассматриваемых в узлах сетки, покрывающей исходную область непрерывного изменения аргумента (рис. 1).

Среди наиболее эффективных алгоритмов решения задачи Стефана, можно упомянуть метод энтальпии. На наш взгляд, наиболее удобным с точки зрения реализации является метод энтальпии, так как для обеих фаз сразу надо решать только одно уравнение теплопроводности, шаг по времени может оставаться постоянным, а число этих шагов не ограничено. Несмотря на несколько меньшую по сравнению с другими методами

скорость, метод энтальпии дает достаточно точное приближение для движения границы раздела фаз [6].

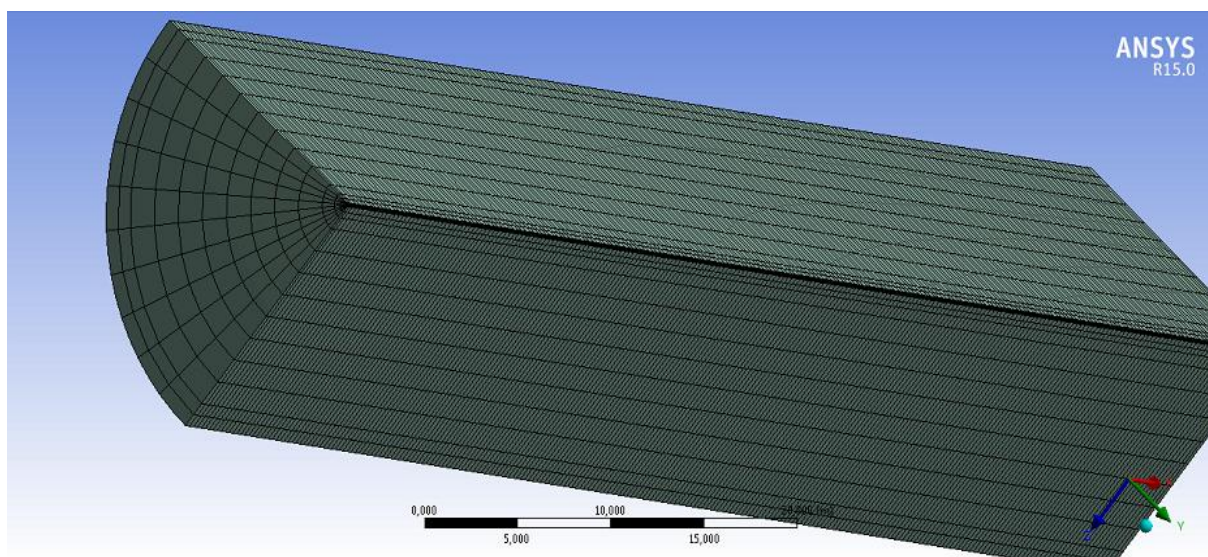


Рис. 1. Конечно – элементная модель

Физическое явление, которое приводит к условию (3), заключается в том, что при температуре фазового перехода T^* происходит поглощение или выделение скрытой теплоты и внутренняя энергия вещества E претерпевает изменение на величину λ , которая называется энтальпией фазового перехода.

Для реализации численного решения задачи (2) - (4) к уравнению (2) был применен метод контрольных объемов. Участок, на котором исследуется растепление породы, разбивается на N интервалов. Для учета граничных и начальных условий дополнительно вводятся нулевой и $(N+1)$ -й виртуальные контрольные объемы. Температура и все характеристики вещества измеряются в серединах объемов и принимаются за характеристики всего объема. Источником тепла является скважина, по которой происходит откачка нефти. За точку $x=0$ берется внешняя стенка скважины.

В случае дискретного аналога решения задачи теплопроводности, нестационарное уравнение теплопроводности (2) преобразуется к виду

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Поскольку решается задача растепления, симметричная относительно центра скважины, для компьютерной реализации алгоритма удобнее сделать переход к полярной системе координат (r, θ) . В этом случае уравнение (6) заменяется его аналогом в полярных координатах [9]:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)$$

Сетка и контрольный объем в координатах (r, θ) изображены на рис. 2.

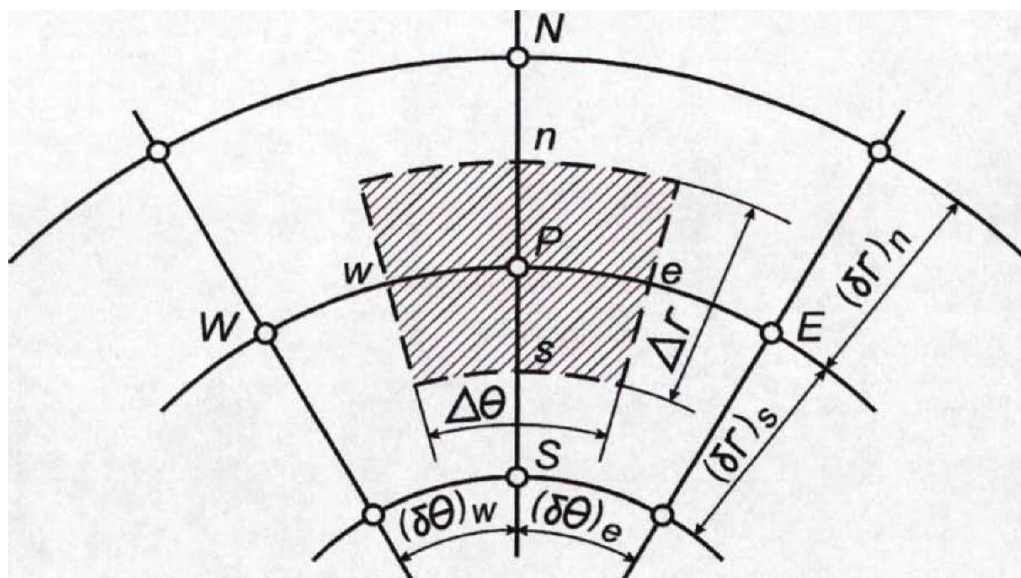


Рис. 2. Сетка и контрольный объем в полярных координатах

Компьютерная реализация выбранного численного алгоритма была произведена в расчетной программе ANSYS, основанная на решении нестационарного уравнения теплопроводности с подвижными фазовыми границами методом конечных разностей с использованием явной схемы аппроксимации исходного дифференциального уравнения, записанного в энтальпийной форме. Программа позволяет получить значения температуры пород вокруг ствола скважины, а также оценить радиус зоны оттаивания пород. По результатам расчетов программа автоматически

строит графики, по которым можно проследить за процессом изменения термического режима вокруг ствола скважины на протяжении некоторого заданного промежутка времени.

Методика, позволяющая реализовать численное решение нестационарных задач теплопроводности с распределенными внутри расчетной области теплоисточниками и подвижными фазовыми границами заключается в следующем. Исследуемая область разбивается на элементарные объемы (сетки). К каждому элементарному объему применяются закон теплопроводности и обычные формулы теплового баланса [10].

Внутренние сетки области определяются такими характеристиками, как плотность, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости талой и мерзлой фазы, теплота фазовых переходов, температура начала оттаивания, а также начальной температурой и объемом талой и мерзлой фаз (табл. 1).

Таблица 1

Теплофизические свойства

	Теплопроводность <i>Вт (м²*С)</i>	Плотность <i>кг/м³</i>	Теплоемкость <i>Дж/(кг*С)</i>
Грунт (мерзлый и талый)	1,25	1000	650
Тампонажный материал	0,3711	1500	800

Расчет температурного поля ведется последовательно на каждый шаг времени. Сетки, находящиеся при минусовой температуре, рассчитываются с учетом теплоты фазовых переходов до полного оттаивания. Размеры сеток могут быть неодинаковыми в различных частях расчетной области и зависят от требуемой детальности прогноза состояния температурного поля.

Расчетная область представляла собой фрагмент геотехнической системы «скважина в однородной среде». Диаметр расчетной области 15 м.

На левой ее границе задана внешняя стенка цементного кольца.

В качестве начальной принята температура -5°C , характерная на территориях распространения мерзлых пород.

Примененная конфигурация и результат расчетной области представляет собой фрагмент сечения геотехнической системы, которая приведена на рис. 3.

В граничных блоках, описывающих образующую скважины, заданы граничные условия 3 рода с постоянной температурой на весь период расчета.

Во всех остальных граничных блоках заданы граничные условия 2 рода с градиентом температуры, равным нулю. Температура флюида составляет 50°C . Условия дневной поверхности в расчете не учитывались. Период расчета составлял 1 год.

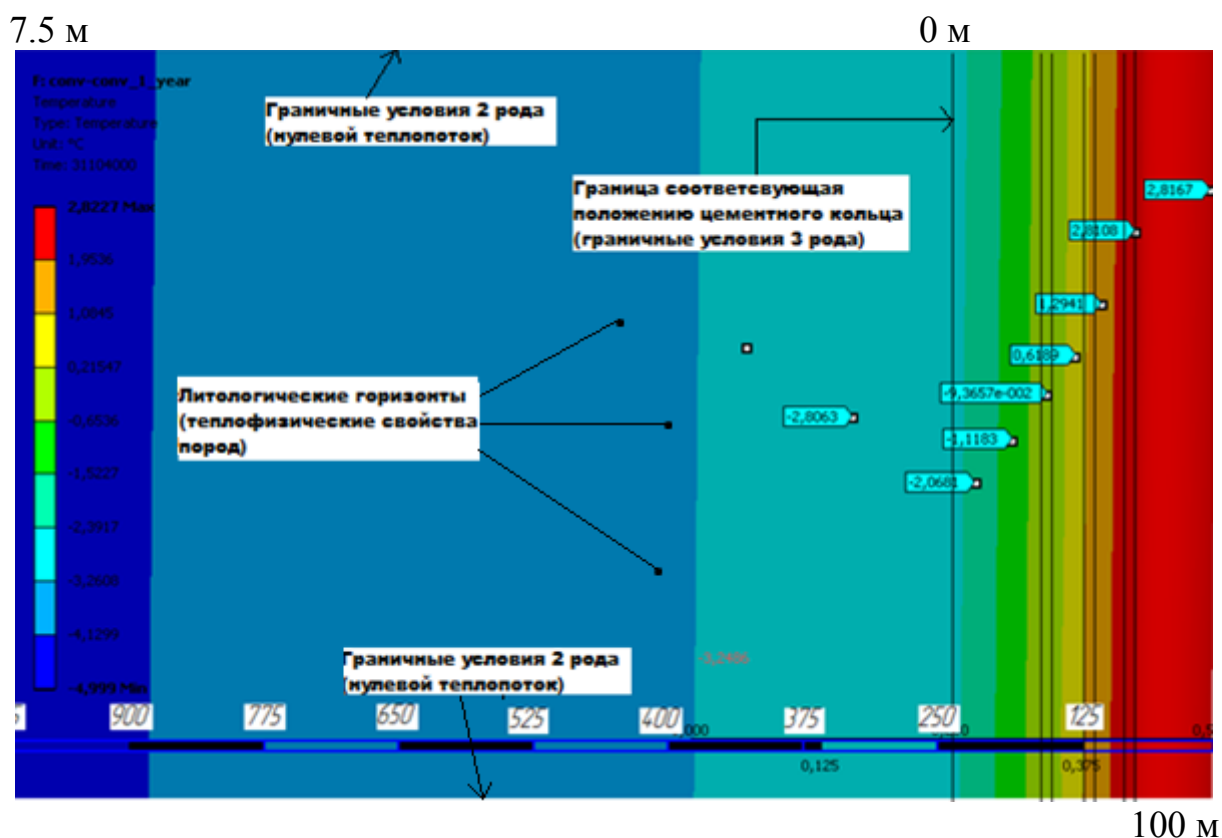


Рис. 3. Результат расчетной области при моделировании нестационарного теплообмена нефтяной скважины и многолетнемерзлых пород

Вывод

Результаты расчета показывают, что выбранные материалы изоляции препятствуют растеплению скважины. Как показано на рисунке 3 через 365 дней средняя температура на границе скважина-грунт составляет -2°C . В представленной модели учитываются физические факторы, влияющие на процесс растепления ММП, такие как: свойства материалов, теплообмен поверхности грунта со скважиной. Разработанная модель позволяет проводить расчеты для расчетной области, состоящей из различных составляющих. 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 из размещении скважин на рабочей площадке.

Список литературы

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС. 2003.
2. Горелик Я.Б., Шабров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород В зоне влияния двух скважин. Криосфера Земли. Т.ХII. № 1.
3. Морозов К.Е. Математическое моделирование в научном познании. М.: «Мысль», 1969.
4. Гречищев С.Е., Мельников Е.С., Москаленко Н.Г. и др. Мелкомасштабная ландшафтно-индикационная карта криолитозоны Западной Сибири как основа для составления геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий. В сб.: Охрана геологической среды в районах Тюменской субарктики. Тюмень, 1984: С. 23-25.
5. Медведский Р.И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномёрзлых породах, М.: Недра, 1987. 230 с.
6. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. № 5. С. 816-817.

7. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. Оценка влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Известия РАН. Серия географическая, 2006, № 4, С. 40-46.
8. Васильев Ф.П., Успенский А.Б. Разностный метод решения двухфазной задачи Стефана//Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 1963. Т.3, № 5. С. 874-886.
9. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
10. Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П., Яковлев С. В. Программа расчета теплового и механического взаимодействия фундаментов сооружений с вечномёрзлыми грунтами: Информ. бюллет./ ВИНТИ. – М., 1983. - №5 – С. 40-41

Сведения об авторах

Искандаров Надир Хабирович, магистрант, группа МГБ 03-14-01, горно-нефтяной факультет, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация
E-mail: faritag@yandex.ru

Агзамов Фарит Акрамович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация
E-mail: faritag@yandex.ru

Authors

N.Kh. Iskandarov, Candidate for Master's Degree, Mining and Petroleum Faculty, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russian Federation

F.A. Agzamov, Dr.Sc. (Eng.), Professor of Well Drilling Chair at Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russian Federation

Агзамов Фарит Акрамович

450062, Российская Федерация, Республика Башкортостан

г.Уфа, ул. Космонавтов, 1

Тел. +7-917-343-1810

E-mail: faritag@yandex.ru