

Геоинформационная модель тепловых процессов горных пород при высокотемпературном воздействии

Geoinformation model of thermal processes in rocks under high temperatures

Ключевые слова: математическое моделирование – mathematical modeling; геоинформационная модель – geoinformation model; высокотемпературное воздействие – high temperatures; подземная газификация – underground gasification.

Математическое моделирование как метод изучения многофакторных и многомерных тепловых процессов, протекающих в многолетнемерзлых горных породах, применяется достаточно давно. В данной статье рассматривается геоинформационная модель экологической задачи, основанная на математической модели температурного поля многолетнемерзлых горных пород при высокотемпературном воздействии, происходящем при подземной газификации полезных ископаемых.

Mathematical modeling as a study method of multifactorial and multidimensional thermal processes in permafrost rocks has been used for a long time. This article considers an environmental task geoinformation model based on mathematical modeling of permafrost rock temperature field under the influence of high temperatures arising from underground gasification process in fossil minerals.

Преимущество метода математического моделирования заключается в том, что реальные термодинамические процессы, протекающие в таких сложных структурах, как горные породы, изучены не полностью. Постоянно выявляются компоненты, пренебрежение которыми ведет к неполному, а вследствие этого – к не точному описанию данного процесса. Метод математического моделирования позволяет динамично, в соответствии с обновленными знаниями из других областей науки (геология, химия, мерзлотоведение и т.д.), в процессе исследования объекта динамично изменять также способы описания процессов, добавляя новые зависимости в уже построенные модели. Использование такого метода на территории Якутии, где проектиро-

КАРМАНОВ

Дмитрий Викторович

(kdemo@yandex.ru)
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по развитию ГИС,
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
Санкт-Петербург

вание и строительство промышленных объектов, в том числе – подземных газогенераторов, сильно зависит от поведения многолетнемерзлых пород, находящихся в непосредственной близости от объекта, наиболее приемлемо.

При рассмотрении вопроса о моделировании любого явления или процесса реальной природы возникает определенная последовательность задач, состоящая из трех этапов: модель – алгоритмы – программа, каждый из которых представляет собой законченную задачу со своими методами исследования. На первом этапе строится математическая модель, при этом используются наиболее характерные свойства реального объекта, а также связи и законы, которым они подчиняются. Для моделирования температурного режима многолетнемерзлых горных пород такими свойствами являются: теплофизические параметры горных пород, температурные данные, удельная теплота фазовых переходов и т.д. На следующем этапе для разработанной модели строятся алгоритмы реализации на компьютере. При этом модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательность вычислительных операций, необходимых для получения неизвестных величин. Так, например, модели промерзания – протаивания горных пород чаще всего решаются с помощью методов сквозного счета, адаптируясь под конкретную задачу. И, наконец, на третьем этапе создаются компьютерные программы, переводящие модель в «экспериментальную установку», пригодную для непосредственно испытания на компьютере.

Подземная газификация – альтернативный способ добычи полезных ископаемых (каменный уголь, торф, горючие сланцы), основанный на сжигании их непосредственно на месте залегания без разработки, и получения горючего

газа, который выводится на поверхность через буровые скважины. Газ, производимый путем подземной газификации, применяют для энергетических нужд. Себестоимость газа ниже себестоимости угля, добываемого шахтным способом, и выше себестоимости угля открытой добычи.

Подземный газогенератор, в свою очередь, представляет собой мощный тепловой источник, который вносит существенное изменение в состояние вмещающих горных пород, причем особенно значительным изменениям подвергаются физико-механические свойства многолетнемерзлых горных пород, вследствие изменения агрегатного состояния находящейся в них влаги. В данном случае при интенсивном тепловом воздействии могут наблюдаться изменения, которые будут препятствовать дальнейшему освоению территорий, находящихся непосредственно в районе подземного газогенератора (термокарстовые процессы, проседания, растрескивание почвы и т.д.).

Многолетнемерзлые горные породы представляют собой горные массивы, в которых вся свободная влага содержится в виде льда, осуществляющего роль цементирующего состава. При помещении в такую среду мощного теплового источника, температура которого достигает 1600 градусов Цельсия, происходит естественный процесс таяния льда, а затем испарения образовавшейся влаги. Таким образом, процесс распространения тепла в многолетнемерзлых горных породах при подземной газификации угля сопровождается двумя фазовыми переходами – плавлением и испарением. В процессе расчета было выделено в горных породах три фазы, характеризующиеся определенным агрегатным состоянием содержащейся влаги: зона, где вся свободная влага находится в твердом состоянии в виде льда, талая зона и зона сухих пород с незначительным количеством влаги ($w < 0,1\%$), содержанием которой можно пренебречь.

Распространение тепла описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности, для каждого из которых задаются соответствующие значения теплофизических параметров. Введение эффективной теплоемкости, учитывающей энергетические вклады фазовых переходов, позволило использовать одно дифференциальное уравнение для всей расчетной области.

Для решения этой задачи были определены граничные условия, исходя из следующих предпосылок:

- размер расчетной области выбирается таким образом, что влиянием тепловых потоков с боковых сторон можно пренебречь;
- температура земной поверхности описывается по гармоничному закону;

– снизу на область действует тепловой поток, равный геотермическому градиенту;

– ввиду того, что радиус очага горения мал по сравнению с размерами расчетной области, его можно представить в виде точечного источника тепла, перемещающегося внутри расчетной области прямолинейно из точки с координатами (x_1, y_1) к точке (x_2, y_2) со скоростью V_2 и имеющего мощность $Q_v(x, y)$;

– начальная температура пород определяется исходя из формулы:

$$T_{нач}(y) = T_0 + G \cdot y,$$

где T_0 – начальная температура пород у поверхности, G – геотермический градиент.

Координатная ось x проходит горизонтально по земной поверхности, ось y расположена перпендикулярно к ней. За начало координат принят левый верхний угол расчетной области. Угольный пласт расположен внутри расчетной области под углом α к оси x , моделирующим угол залегания пласта в горных породах. В двумерном случае задача определения температурного поля мерзлых пород, претерпевающих два фазовых перехода, описывается дифференциальным уравнением, в котором энергетические вклады фазовых переходов находятся аддитивно и позволяют существовать границам фазовых переходов независимо друг от друга.

В общем виде, учитывая начальные и граничные условия, математическую модель можно будет записать следующим образом:

$$\begin{aligned} & [c\rho(T) + D_{nl} \cdot \delta(T - T_{nl}) + D_{ucn} \cdot \delta(T - T_{ucn})] \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial T}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & + Q_v(x, y) \cdot \delta(x_0 + v_x t) \cdot \delta(y_0 + v_y t), \end{aligned}$$

где $Q_v(x, y)$ – мощность внутреннего источника теплоты в точке (x, y) области;

v_x и v_y – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости перемещения точечного источника.

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} = 0, & x = 0, & y \in [0, Hi], & t \in (0, T_{max}] \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0, & x = Len, & y \in [0, Hi], & t \in (0, T_{max}] \\ \frac{\partial T}{\partial y} = G, & x \in [0, Len], & y = Hi, & t \in (0, T_{max}] \\ T(x, 0, t) = T_b(t), & x \in [0, Len], & t \in (0, T_{max}] \end{cases},$$

$$T(x, y, 0) = T_{нач}(y), \quad x \in (0, Len), \quad y \in (0, Hi),$$

$$c\rho = \begin{cases} c\rho_m, & T < T_{nl} \\ c\rho_m, & T_{nl} < T < T_{ucn} \\ c\rho_c, & T > T_{ucn} \end{cases}, \quad \lambda = \begin{cases} \lambda_m, & T < T_{nl} \\ \lambda_m, & T_{nl} < T < T_{ucn} \\ \lambda_c, & T > T_{ucn} \end{cases},$$

$c\rho_m, c\rho_t, c\rho_c$ – объемные теплоемкости грунта для мерзлых, талых и сухих пород;

$\lambda_m, \lambda_t, \lambda_c$ – коэффициенты теплопроводности, соответственно – мерзлых, талых и сухих горных пород;

T_{nl} – температура фазового перехода «лед – вода»;

T_{ucn} – температура фазового перехода «вода – пар».

Метод естественного расщепления граничных условий в совокупности с методом суммарной аппроксимации позволяет разделить исходную

задачу на две одномерные задачи, одна из которых предназначена для расчета температурного поля по направлению x , вторая – по направлению y . При расщеплении на две одномерные задачи без существенной потери точности тепловое влияние точечного источника учитывалось только по направлению x , в то время как по направлению y тепло распространяется в пространстве кондуктивным переносом.

Разностный аналог дифференциального уравнения можно записать в виде:

$$c\rho_{\phi_i} \bar{h}_i \frac{T_i^{j+1} + T_i^j}{\tau_k} = \bar{\lambda}_{i+1} \frac{T_{i+1}^{j+1} + T_i^{j+1}}{h_{i+1}} - \bar{\lambda}_i \frac{T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{h_i} + \bar{h}_i \phi_i.$$

Теплофизические коэффициенты принимались постоянными в пределах одной ячейки, для

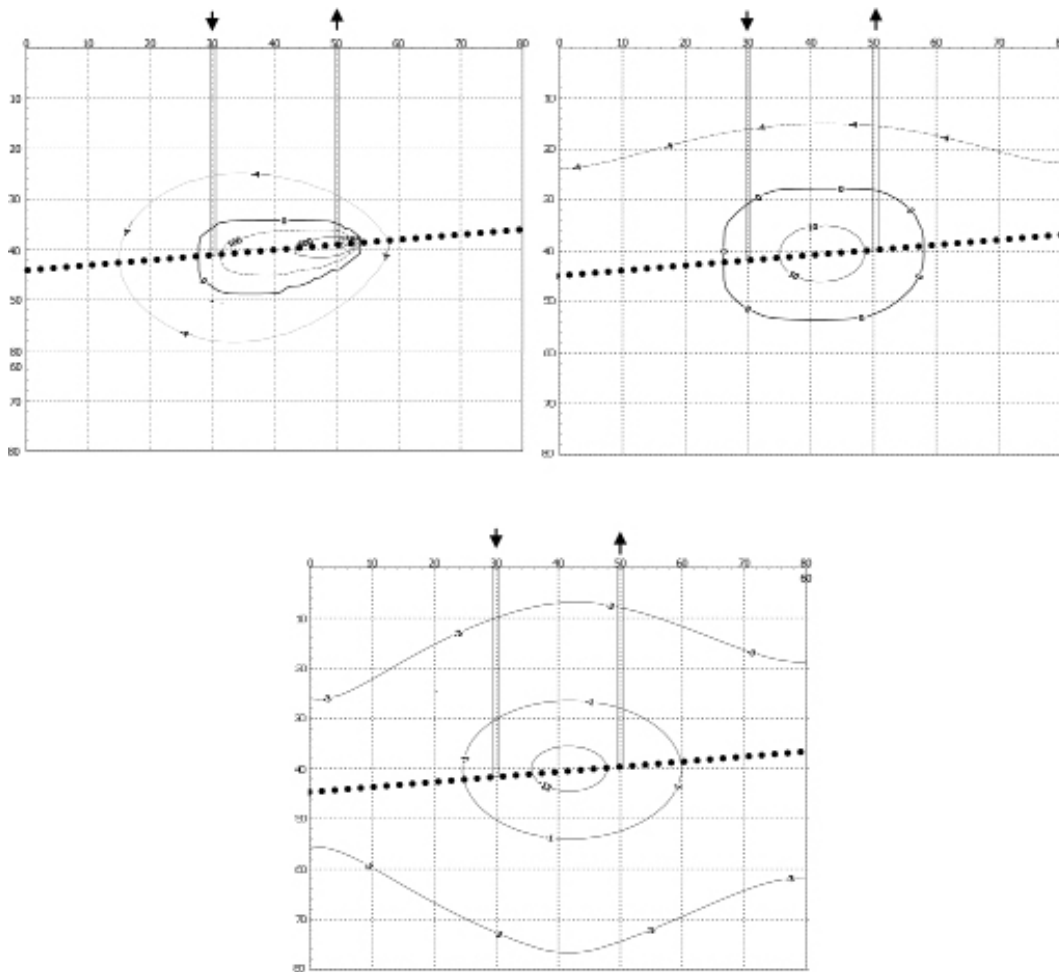


Схема температурного поля газогенератора

их определения выведены формулы сглаживания в пределах одной ячейки разностной сетки. При моделировании очага горения учитывалось, что в общем случае точечный источник не попадает ни в один из узлов разностной сетки w_{xy} , поэтому рассматривалась методика «размазывания» точечного источника в пределах одной ячейки с учетом введения весового коэффициента, характеризующего положение источника внутри ячейки.

Для реализации разработанных разностных схем использован следующий алгоритм:

1. Для всех внутренних узлов сетки задается значение начального распределения температуры $T_{нач}(y)$.

2. Для граничных узлов при $y = 0$ вычисляются значения температуры воздуха на поверхности по гармоничному закону.

3. Рассчитываются координаты источника теплоты по формулам $x_0 = x_0 + v_x \tau$ и $y_0 = y_0 + v_y \tau$.

4. Решается разностное уравнение по направлению x .

5. С использованием предыдущего решения в качестве входных данных решается разностное уравнение по направлению y , при этом получаем решение на следующем временном слое.

6. Если не исчерпан заданный интервал времени, увеличиваем время и возвращаемся к пункту 2.

Алгоритм реализации разработанной математической модели на основе методов сквозного счета реализован в вычислительной программе «PGUShell», обеспечивающей расчет температурного поля проектируемого подземного газогенератора в зависимости от его параметров. В качестве исходных параметров математической модели для проведения тестового расчета были использованы данные реального участка, расположенного в юго-восточной части Денисовского каменноугольного месторождения Южной Якутии.

Для расчета использованы параметры пласта D_{15} , залегающего под углом 3 градуса, на глубине от 20 до 45 м. Средняя мощность пласта — 1,54 м, пределы — от 1,0 до 2,13 м. В мерзлотном отношении участок находится в области островного развития многолетнемерзлых пород с глубиной промерзания пород до 100 м со среднегодовой температурой —4 градуса Цельсия. Сезонное протаивание многолетнемерзлых пород сверху составляет до 1–1,5 м в депрессиях рельефа, значительное колебание температур в течение года происходит до глубины 20–30 м. Сезонное протаивание пород начинается в мае и кончается в октябре — декабре.

В результате математического моделирования работы вышеописанного подземного газогенератора были получены следующие результаты и

определены этапы формирования температурного поля вмещающих пород:

— «Рабочий режим» — скорость распространения очага горения в реакционном канале составит $V_2 = 0,2$ м/сут, а время отработки (выгорания) угольного пласта — 101,7 сут. Значение максимальной температуры в очаге горения достигнет 1396 градусов Цельсия. Мерзлые породы изменят свое агрегатное состояние на талое на расстоянии 6–7 м от канала газификации;

— «Тепловая инерция» — после завершения процесса газификации от нагретых участков тепло продолжает распространяться, и максимальное протаивание достигнет 12–13 м через 1168 сут.;

— «Восстановительный этап» — температурный режим начинает возвращаться в свое естественное состояние, и по истечению 8 лет массив горных пород практически вернется в свое первоначальное агрегатное состояние.

Разработанная математическая модель процесса теплообмена в многолетнемерзлых горных породах при высокотемпературном воздействии, учитывающая влияние двух фазовых переходов свободной влаги горных пород, а также наличие подвижного источника тепла, описывает температурное поле горного массива дифференциальным уравнением теплопроводности. Решение задачи теплопереноса в средах с изменяющимся фазовым состоянием осуществляется при этом на основе итерационно-разностных схем сквозного счета и линеаризации разрывных теплофизических коэффициентов.

Второй уровень математического моделирования обеспечивает эквивалентное моделирование на основе общих показателей работы промышленных объектов и степени их воздействия на окружающую среду. Эквивалентные модели необходимо иметь, прежде всего, на уровне администрации региона с целью оперативного прогнозирования экологической обстановки, а также определения размера затрат на уменьшение количества вредных выбросов в окружающей среде.

Литература

1. Карманов Д.В., Герике Б.Л., Лазаренко С.Н. Математическое моделирование теплового режима многолетнемерзлых горных пород при подземной газификации угля // Препринт ИУУ СО РАН. — 2000. — № 3.
2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. — М.: «Наука», 1997.
3. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. — М.: «Едиториал УРСС», 2003.