УДК 51:536.24(571.56)

В.И. Слепцов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВЕТРИВАНИЯ НИЖНЕЙ ЧАСТИ КАРЬЕРА ЧЕРЕЗ НАКЛОННЫЕ ВЫРАБОТКИ

Методом математического моделирования совместно решены: задача о распределении скорости и температуры воздуха в стволе и задача о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола. Исследована возможность проветривания глубоких карьеров через наклонные стволы. Сделан вывод, что подогревая воздух в устье наклонной подземной выработки можно достичь скоростей, позволяющих производить проветривание, по крайней мере, нижней части карьера в разумные сроки.

Ключевые слова: температурное поле, многолетнемерзлые породы, фазовый переход, наклонная горная выработка, открытые горные работы, проветривание карьеров, математическая модель, теплообмен

V.I. Slepcov

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВЕТРИВАНИЯ НИЖНЕЙ ЧАСТИ КАРЬЕРА ЧЕРЕЗ НАКЛОННЫЕ ВЫРАБОТКИ

By method of mathematical modeling are in common solved: a problem about distribution of speed and temperatures of air in a shaft and a problem about distribution of temperature in a massif around of a shaft. The opportunity of airing deep open-cast mines through inclined shafts is investigated. The conclusion is made, that warming up air in a mouth of inclined underground opening it is possible to reach the speeds, allowing to make airing, at least, the bottom part open-cast mines in reasonable terms.

Key words: thermal field, permafrost rocks, phase change, inclined working, open pit mining, pit aeration, mathematical modeling, heat exchange,

Многие карьеры по добыче полезных ископаемых, находящиеся в условиях резко-континентального климата, по соотношению глубины и диаметра относятся к глубоким [1], то есть к таким, которые не продуваются энергией ветра, поэтому требуют искусственного проветривания. Некоторые из них по экологическим причинам простаивают значительное время. Проблема возникает, в основном, в холодное время года, когда вертикальные потоки воздуха практически отсутствуют и загрязненный воздух собирается в нижней части карьера.

В карьерах Севера в холодное время года в выработках, соединяющих поверхность с дном карьера, возникает поток воздуха, направленный к поверхности, скорость которого стремительно возрастает при подогреве воздуха в нижней части выработки. Поэтому кажется перспективным проведение подземных выработок, совмещающих функции транспортных и воздухоподающих.

Поставим следующую прикладную задачу:

Имеется карьер заданной глубины H. Со дна карьера в массиве горных пород проведен наклонный ствол под углом φ. Требуется определить скорость движения и расход воздуха в стволе в зависимости от температуры и давления воздуха в карьере (T_0, P_0) и на дневной поверхности (T_H, P_H).

Для решения поставленной задачи в общем случае необходимо совместное решение двух задач:

– задача о распределении скорости и температуры воздуха в стволе;

– задача о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола.

Задача о распределении скорости и температуры воздуха в стволе. Рассмотрим процесс свободной конвекции в вертикальной трубе круглого сечения и допустим, что температура стенки трубы известна. Общие уравнения газовой динамики Навье-Стокса [2] путем упрощений и допущений (осесимметричность, стационарность, $\frac{\partial P}{\partial r}=0$, $V_r=0$ и др.) и вводя усредненные по сечению трубы величины (средняя скорость (V), средняя плотность (ρ) и средняя температура(T)) можно привести к следующему виду для цилиндрической системы координат (r, θ, z)

$$\rho V = const,$$

$$\rho V\frac{\partial V}{\partial z} = -g(\rho-\rho_0) - \kappa R\left(T\frac{\partial \rho}{\partial z}+\rho\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\frac{\xi_m}{4r_m}\rho V^2,$$

$$c_p\rho V\frac{\partial T}{\partial z}=\frac{2}{r_m}\alpha(T_c-T)+ \kappa R V\left(T\frac{\partial \rho}{\partial z}+\rho\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{\xi_m}{8r_m}\frac{n+2}{n}\rho V^3,$$

где g – ускорение свободного падения; T_c – температура стенок трубы; α – коэффициент теплообмена воздуха со стенками трубы; ξ_T – гидравлический коэффициент трения трубы; c_p – удельная теплоемкость воздуха; κ – коэффициент сжимаемости; R – универсальная газовая постоянная, r_T – радиус трубы; n – показатель который для ламинарного течения равен 2, а для турбулентного течения зависит от числа Рейнольдса (Re) и меняется от 1/6 до 1/10; ρ_0 – распределение плотности среды по высоте при условии, что среда неподвижна, то есть компоненты вектора скорости равны 0.

Находим распределение плотности среды по высоте ($\rho_0(z)$) из условия неподвижности среды. Имеем три уравнения

$$\frac{\partial P}{\partial z}=-g\rho, \quad \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)=0, \quad P=\rho\kappa RT,$$

где $\eta(T)$ – динамическая вязкость среды.

Из второго уравнения следует, что температура зависит только от высоты. Из первого и третьего уравнения получаем, что распределение давления по высоте выражается следующей формулой

$$\frac{P(z)}{P_a}=\exp\left(-\frac{g}{\kappa R}\int_{z_a}^{z}\frac{dz}{T(z)}\right),$$

где $P_a=P(z_a)$ – известное значение давления в точке $z=z_a$.

Для динамической вязкости воздуха наиболее часто используют формулу Сатерленда [2]

$$\frac{\eta}{\eta_0}=\frac{T_0+S}{T+S}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,5}, \quad (S = 114\ K)$$

или степенной закон [2]

$$\frac{\eta}{\eta_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\omega}, \quad 0,5<\omega<1, \ (\omega\approx 0,76).$$

Нижний индекс "0" означает некоторое характерное состояние, например, при T_0=273,16 K и P_0= 0,0981 *МПа*.

Распределение температуры по высоте при $\mathbf{z_a<z<z_b}$ удовлетворяет следующим соотношениям:

- если вязкость зависит от температуры по формуле Сатерленда, то

$$\sqrt{\frac{T(z)}{S}}\left(\frac{T(z)}{3S}-1\right)+\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{T(z)}{S}}=$$

$$=\sqrt{\frac{T_a}{S}}\left(\frac{T_a}{3S}-1\right)+\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{T_a}{S}}+ \qquad ;$$

$$+\left(\begin{matrix}\sqrt{\frac{T_b}{S}}\left(\frac{T_b}{3S}-1\right)-\sqrt{\frac{T_a}{S}}\left(\frac{T_a}{3S}-1\right)+\\ +\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{T_b}{S}}-\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{T_a}{S}}\end{matrix}\right)\frac{z-z_a}{z_b-z_a}$$

- если вязкость зависит от температуры по степенному закону, то

$$\frac{T(z)}{T_a}=\left(1+\left(\left(\frac{T_b}{T_a}\right)^{\omega+1}-1\right)\frac{z-z_a}{z_b-z_a}\right)^{\frac{1}{\omega+1}}.$$

Здесь $T_a=T(z_a)$ и $T_b=T(z_b)$ – известные значения температуры в точках $z=z_a$ и $z=z_b$. Теперь, зная распределение температуры, и вычисляя распределение давления, из уравнения состояния получаем распределение плотности по высоте при условии неподвижности среды.

Кроме основных уравнений для замыкания математической модели, необходимо поставить граничные условия на концах трубы. Примем следующие граничные условия:

- при $z = 0$ $P(0)=P_0$, $T(0)=T_0$;
- при $z = H$ $P(H)=P_H$.

Если труба наклонена под углом φ, то в математической модели в качестве g принимается величина $\frac{g}{\sin(\varphi)}$, а в качестве H – величина $\frac{H}{\sin(\varphi)}$.

Задача о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола. Процесс распространения тепла в массиве многолетнемерзлых горных пород вокруг выработки удовлетворительно описывается уравнением типа Стефана, то есть в расчетной области $\Omega:\{(r,z)\,|\; r_T<r<r_\infty,\; 0<z<H\}$ при $t>0$ выполняются следующие уравнения [3]:

$$\left(c\rho\,(T)+D\delta(T-T_f)\right)\frac{\partial T}{\partial t}=$$

$$=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right),$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}=\alpha(T_в-T) \quad \text{при } r=r_T,$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}=0 \quad \text{при } r=r_\infty,$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}=0 \quad \text{при } z=0,$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}=0 \quad \text{при } z=H,$$

$T(r,z,0)=T_п$ при $(r,z)\in\Omega$,

где $T(r,z,t)$ – температура горных пород; t – время; r_∞ – радиус теплового влияния выработки; $c\rho(T)$ – объемная теплоемкость горных пород; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности горных пород; D – скрытая объемная теплота фазового перехода горных пород; T_f – температура фазового перехода горных пород; $\delta\,(T)$ – функция точечного источника (δ-функция Дирака); $T_в$ – температура воздуха в выработке; α – коэффициент теплообмена воздуха со стенками выработки.

Для определения коэффициента теплообмена воздуха со стенками выработки при турбулентном течении используем следующую формулу [2]

$$\alpha=0{,}15\lambda\,(g(\mathrm{Pr}\cdot|1-T_c/T|\,\rho^2/\eta^2)^{0{,}33},$$

где λ, ρ, η, T – теплопроводность, плотность, динамическая вязкость и температура воздуха, соответственно.

Понятно, что $T_в(z,t)$ в задаче о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола соответствует $T(z)$ в задаче о распределении скорости и температуры воздуха в стволе, а $T_c(z)$ в задаче о распределении скорости и температуры воздуха в стволе соответствует $T(r_m,z,t)$ в задаче о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола. Обе задачи решались конечно-разностными методами.

Для совместного решения задач на каждом временном шаге применялся метод простой итерации:

– для некоторого распределения температуры горных пород на стенке выработки (на начальном этапе принималось распределение температур с прошлого временного слоя) решалась задача о распределении скорости и температуры воздуха в стволе;

– используя вычисленные температуру и скорость воздуха, через граничное условие уточнялось распределение температур в массиве путем решения задачи о распределении температуры в массиве горных пород вокруг ствола;

– процесс повторялся до тех пор, пока не достигалась некоторая заданная точность.

По данному алгоритму разработана и оттестирована программа на алгоритмическом языке "Fortran–90" и проведен вычислительный эксперимент.

Произведены расчеты для следующих исходных данных:

глубина карьера 600м; температура на дне карьера $T_0 = -50^0$C и изменяется с шагом 5^0C; температура на поверхности $T_H = -30^0$C; естественная температура массива горных пород – 1^0C; радиус ствола 2,4 м; углы наклона ствола φ 14^0 и 60^0.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Подогревая воздух в устье наклонной подземной выработки можно достичь скоростей, позволяющих производить проветривание, по крайней мере, нижней части карьера в разумные сроки.

2. Стенки наклонной выработки промораживаются, поэтому их устойчивость обеспечивается без крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ушаков К.З., Михайлов В.А.* Аэрология карьеров.- М:, Недра, 1985.- 274 с.

2. *Справочник* по теплообменникам: В 2-х т. Т.1 /Пер. с англ., под ред. Б.С.Петухова и др. -М: Энергоатомиздат, 1987.-560 с.

3. *Изаксон В.Ю., Самохин А.В., Петров Е.Е., Слепцов В.И.* Вопросы устойчивости обнажений многолетнемерзлых горных пород. -Новосибирск: ВО "Наука", Сибирская издательская фирма, 1994.-165 с. ГИАБ

Коротко об авторе

Слепцов В.И. – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, v.i.sleptsov@igds.ysn.ru