

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.822.2: 622.271: 519.6

Н.В. Трушникова

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ЛОКАЦИИ ОЧАГА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОТЕНЦИАЛА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

Одним из эффективных технологических процессов добычи углей является открытый способ. Преимущества открытых горных работ по сравнению с подземными разработками заключаются в том, что на карьерах обеспечивается достаточно высокая безопасность труда, производительность работ выше, а себестоимость добываемых углей в 2-4 раза ниже.

Однако открытые способы добычи имеют свои недостатки: необходимость отчуждения больших земельных участков; понижение уровня грунтовых вод на больших площадях; зависимость от климатических условий, что наиболее сильно проявляется в районах супервого климата.

Наряду с этим следует отметить, что при проведении вскрышных работ нарушается структура горной среды (увеличивается трещиноватость и кусковатость породы). Это может приводить к процессам самонагревания и самовозгорания угля в уступах рабочих площадок [1-4]. Для Кузбасса и других угольных регионов, актуальной задачей является определение расположения очагов самонагревания и самовозгорания углей в угольных пластах и рабочих уступах карьерного поля. Из-за отсутствия информации о точном расположении очагов тепловыделения и их геометрической формы затруднительно построить правильную стратегию ликвидации эндогенных пожаров, которые могут продолжаться по несколько лет, что приводит к экономическим потерям и экологическим проблемам.

Поэтому определение основных параметров очагов самонагревания и самовозгорания в угольных пластах и уступах при открытых горных разработках является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения. Одним из методов решения подобных проблем является теория обратных задач и применение численных алгоритмов нахождения искомых параметров. Решение этих обратных задач следует осуществлять последовательно: первоначально определяется «геометрия» (форма) области самонагревания, затем восстанавливается распределение температуры (или градиента электрического потенциала) на поверхности очага.

Математическая модель, численные алгорит-

мы и тестовые расчеты по первой задаче рассмотрены в работах [5,6], для решения второй проблемы может быть использован математический аппарат, предложенный в [7,8].

В настоящей работе рассматривается обратная задача восстановления поверхности объемного теплового источника в массиве по измеренному экспериментально градиенту потенциала термоэлектрического поля на дневной поверхности угольного разреза. Проводится сравнение полученных результатов с данными натурного эксперимента из работы [3]. При изложении результатов используются данные экспериментов по измерениям, как температуры угольной среды, так и потенциала электрического поля [3]. Следует отметить, что в работах [2-4] из теоретического анализа и обработки данных экспериментов получены аналитические зависимости между вариациями температуры и потенциала электрического поля. Это позволяет определять связи между градиентами потенциала электрического поля и распределением температуры на дневной поверхности угольного массива.

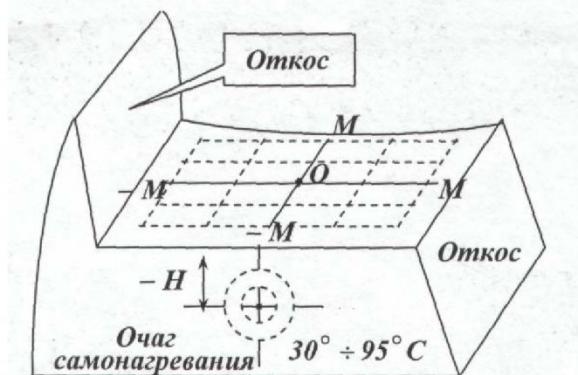


Рис. 1. Схематичное изображение очага самонагревания в угольном уступе

На рис. 1. приведено схематичное изображение очага самонагревания на уступе угольного пласта, расположенного на глубине H от дневной поверхности. Предполагается, что область экспериментальных измерений расположена в квадрате

$[-M, M] \times [-M, M]$, а распределение температуры внутри очага варьируется в пределах от 30° до 95° . Такое предположение о распределении температуры внутри очага является достаточно условным, основано на экспериментальных данных и требует дополнительных исследований (например, решением задач, рассмотренных в [7,8]).

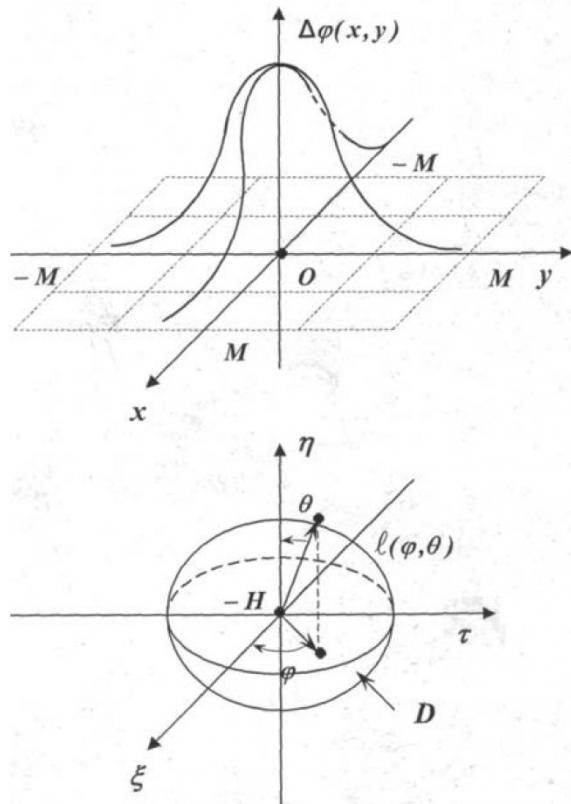


Рис. 2. Геометрическая интерпретация задачи в пространстве R^3

На рис. 2. представлена геометрическая иллюстрация решаемой пространственной задачи: источник тепловыделения расположен в области D с границей $l(\varphi, \theta)$, где φ, θ - значения соответствующих углов в сферической системе координат (φ, θ, l) , привязанной к декартовой системе (ξ, τ, η) ; $\Delta\varphi(x, y)$ - градиент потенциала φ , измеряемый на дневной поверхности ($z=0$) в области $[-M, M] \times [-M, M]$.

Решение обратной задачи сводится к восстановлению поверхности области D по измеряемому градиенту потенциала электрического поля $\Delta\varphi$ на дневной поверхности:

$$\Delta\varphi(x_0, y_0, 0) = \frac{\partial\varphi(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} \Big|_{z_0=0},$$

где x_0, y_0 - координаты точек измерений. Искомая функция поверхности очага тепловыделения $l=l(\varphi, \theta)$ определяется из нелинейного

интегрального уравнения первого рода (см. [5,6]):

$$\psi_1(x_0, y_0) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} K(x_0, y_0, \varphi, \theta, l(\varphi, \theta)) d\theta, \quad (1)$$

где

$$\psi_1(x_0, y_0) = -\Delta\varphi(x_0, y_0, 0) / k,$$

k - эффективная плотность электрических зарядов на поверхности D ;

$$K(x_0, y_0, \varphi, \theta, l(\varphi, \theta)) = \sin \theta \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{(a^2 - b^2) \sqrt{\ell^2(\varphi, \theta) - 2b\ell(\varphi, \theta) + a^2}} \times \right. \\ \times (a^2 [Hb + c(2a^2 - 3b^2)]) + \\ + [H(a^2 - 2b^2) - cb(5a^2 - 6b^2)] \times \\ \times \ell(\varphi, \theta) + c(a^2 - b^2) \ell^2(\varphi, \theta) \Big) + (H - 3bc) \times \\ \times \ln \frac{\sqrt{\ell^2(\varphi, \theta) - 2b\ell(\varphi, \theta) + a^2} + \ell(\varphi, \theta) - b}{a - b} + \\ \left. + \frac{a[Hb + c(2a^2 - 3b^2)]}{a^2 - b^2} \right\},$$

$$a^2 = x_0^2 + y_0^2 + H^2, \\ b = x_0 \sin \theta \cos \varphi + y_0 \sin \theta \sin \varphi + H \cos \theta, \\ c = \cos \theta, \quad a > |b|.$$

Так как входные данные задачи: $\Delta\varphi(x_0, y_0, 0)$ определяются из эксперимента с погрешностью $\delta > 0$ и задача некорректна, то для нахождения приближенного решения уравнения (1) целесообразно применение регуляризирующих по Тихонову алгоритмов [5].

Численный алгоритм решения нелинейного уравнения (1) и модельные расчеты, иллюстрирующие его эффективность, приведены в [6].

Результаты обработки реального эксперимента измерения температуры стенок скважин

Глубина скважины, M	Номера скважин						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура $T, ^\circ\text{C}$							
0.25	15	20	23	40	25	15	15
0.50	20	20	20	40	28	13	13
1.00	19	18	18	93	32	10	8
1.50	15	30	21	48	60	9	6
2.00	8	21	20	30	70	9.5	6
2.50	18	20	18	18	44	10	6
3.00	19	18	18	18	23	10.5	6

Важным вопросом является проверка адекватности построенных математических моделей, а также их анализ и сравнение получаемых результатов при фиксированной погрешности измерений δ . Основным критерием состоятельности

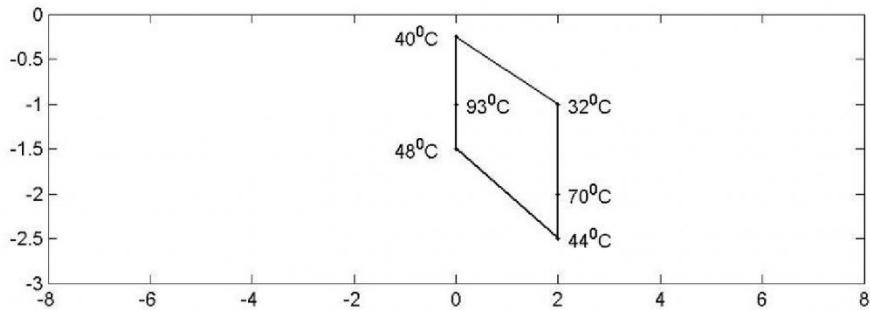


Рис. 3. Аппроксимация границы очага тепловыделения по данным эксперимента (скважины с №№ 1 – 7)

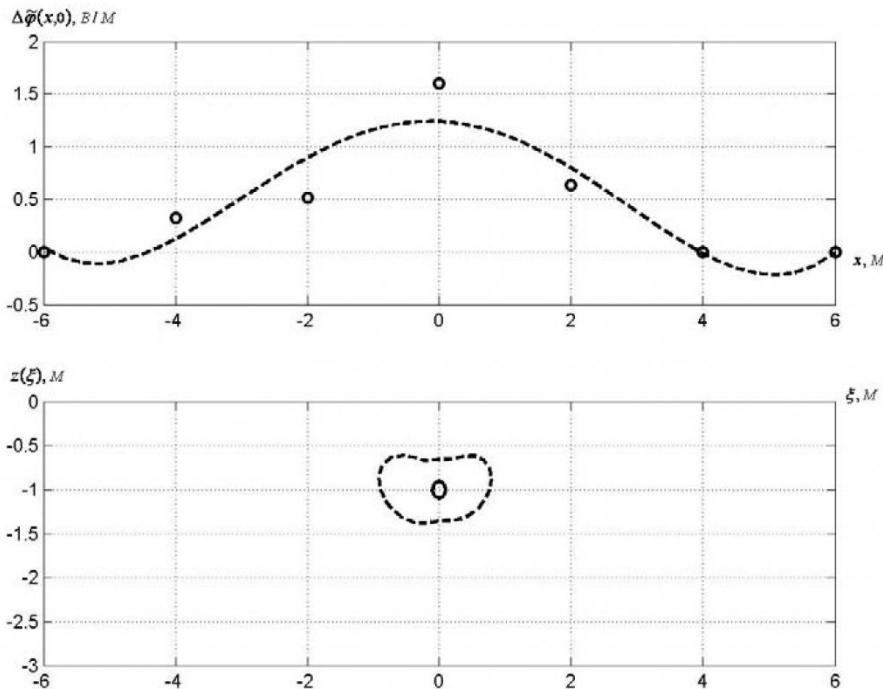


Рис. 4. Распределение градиента потенциала $\Delta\tilde{\varphi}(x,0)$ и результаты восстановления границы теплового источника $z(\xi)$ для пласта "Мощный" (профиль 35).

моделей может быть проведение натурного эксперимента, например, бурение контрольных скважин, а также согласованность численных результатов с данными эксперимента.

На стенах скважин производится измерение температуры горного массива по глубине скважины, а также регистрация основных компонент газовой фазы: O_2 , CO_2 и CO , выделяемых при окислительно-восстановительных процессах в угольной массе [1-3].

Результаты обработки реального эксперимента измерения температуры стенок скважин, проведенного на пласте «Мощный» (профиль 35), при наличии теплового источника в угольном массиве [3] приведены в таблице.

Анализ экспериментальных данных показывает, что сечение очага тепловыделения ($v_0=0$) расположено между скважинами № 3 и № 6, на

глубине от $0.5 M$ до $2.5 M$. Температура атмосферы (воздуха) T_0 над дневной поверхностью считалась постоянной и, приблизительно, равнялась $15^\circ C$.

Построим приближенно границу источника тепловыделения, исходя из следующих соображений. В точки границы будем включать значения координат (ξ, z) , если температура в этих узлах более $30^\circ C$.

На рис. 3 представлена "аппроксимация" границы источника тепловыделения – четырехугольник, построенный на основе данных из таблицы.

Используя формулу связи между вариациями потенциала электрического поля $\delta\varphi(\vec{x})$ и изменениями поля температуры $\delta T(\vec{x})$ в массиве [4], были найдены приближенные значения потенциа-

ла $\tilde{\varphi}(x_i, 0)$ и градиента потенциала $\Delta\tilde{\varphi}(x_i, 0)$.

Приведем результаты первичной обработки этого эксперимента, методом наименьших квадратов, используя аппроксимацию данных многочленом четвертой степени.

Пусть массивы x_1 , y_1 - координаты скважин и значения потенциала $\tilde{\varphi}(x_i, 0)$, соответственно, Y -аналитическая зависимость при аппроксимации градиента потенциала $\Delta\tilde{\varphi}(x_i, 0)$.

Имеем

$$\begin{aligned} Y = & 0.201515x^4 + 0.066667x^3 - \\ & -10.648485x^2 - 2.780952x + \\ & +123.982664 \text{ мВ/м}; \\ x_1 = & [-6 \ -4 \ -2 \ 0 \ 2 \ 4 \ 6] \text{ м}; \\ y_1 = & [0 \ 32 \ 51.2 \ 160 \ 0 \ 0] \text{ мВ/м} \end{aligned}$$

При этом относительная среднеквадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных $R1$ составляла приблизительно 32% .

Результаты численных расчетов решения нелинейного интегрального уравнения (1) представлены на рис. 4.

Сравнение полученных результатов (рис. 3 и 4) показывают удовлетворительное согласование "восстановленной" границы теплового источника $z(\xi)$ с данными эксперимента.

Это может служить подтверждением адекватности математической модели, а также эффективности методики для определения границы очага тепловыделения в угольном массиве, разработанной в работах [5,6].

Оценка границы очагов тепловых источников может быть использована на практике: для оперативного прогнозирования развития (и контроля) процессов самонагревания и самовозгорания, а также их ликвидации (тушения) при минимальных экономических затратах (например, бурение минимального количества скважин для подачи антипригонов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Линденау, Н.И.* Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
2. Физический контроль массивов горных пород / Б.Г. Тараков, В.В. Иванов, В.В.Дырдин, А.Н. Фокин. – М.: Недра, 1994. – 240 с.
3. *Кроль, Г.В.* Разработка электрометрического способа контроля самонагревания и самовозгорания каменного угля на разрезах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01: защищена 16.12.83: утв. 16.05.84 / Кроль Георгий Васильевич; ВостНИИ. – Кемерово, 1983. – 195 с. – Библиогр.102 назв.
4. *Алексеев, Д.В.* Механизм формирования квазистационарного электрического поля в массиве горных пород при наличии естественных и техногенных тепловых источников / Д.В. Алексеев, П.В. Егоров // ФТПРПИ. – 1994. – № 5. – С. 3 – 7.
5. *Трушникова, Н.В.* Об определении формы объемного теплового источника в массиве горных пород по измерениям электрического потенциала на поверхности / Н.В. Трушникова // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. междунар. конф. – Новосибирск. – ИГД СО РАН. – 2001. – С. 165–167.
6. *Трушникова, Н.В.* Определение некоторых параметров объемных тепловых источников в массиве горных пород по распределению градиента электрического потенциала на поверхности / Н.В. Трушникова // Вестн. Кузбасского гос. тех. Univ., 2006, № 6. – С. 3 – 7.
7. *Berntsson, F.* Numerical solution of a Cauchy problem for the Laplace equation / F. Berntsson, L. Elden // Inverse Problems. –2001. – № 17. – P. 839 – 853.
8. *Kress, R.* Nonlinear integral equations and the iterative solution for an inverse boundary value problem / R. Kress, W. Rundell // Inverse Problems. –2005. – № 21. – P. 1207 – 1223.

Автор статьи:

Трушникова

Надежда Васильевна

- ст. преп. каф. математики КузГТУ.

Тел 8-3842-39-63-19.

8-3842-53-05-63