МИНИСТЕРСТВО ВНУТРЕННИХ ДЕЛ УКРАИНЫ

АКАДЕМИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УКРАИНЫ

# ПРОБЛЕМЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**Сборник научных трудов**

**(10-й годовщине независимости Украины посвящается)**

**Выпуск 9**

Утверждено к печати ученым советом
АПБ Украины
(протокол № 12 от 18.04.2001 г.)

АО "Фолио"
Харьков 2001

УДК 614.8

Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. АПБ Украины. – Вып. 9. – Харьков: Фолио, 2001. – 262 с.

ISBN 966-03-1091-9

В сборнике представлены результаты научных исследований в области пожарной безопасности. Рассматриваются организационно-технические аспекты совершенствования пожарной безопасности, отражающие современные методы повышения эффективности противопожарной защиты и тенденции развития научных исследований в данной области.

Материалы предназначены для инженерно-технических работников пожарной охраны, профессорско-преподавательского состава, адъюнктов, слушателей и курсантов пожарно-технических учебных заведений.

Ил.– 66, табл.– 47.



Рецензенты: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко,
д-р техн. наук, проф. О.Г. Руденко.

ISBN 966-03-1091-9

# К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОНАГРЕВАНИЯ НАСЫПИ ГНЕЗДОВЫМ СФЕРИЧЕСКИМ ОЧАГОМ С УВЕЛИЧИВАЮЩИМСЯ РАДИУСОМ

докт. физ.-мат. наук В.П. Ольшанский, В.В. Тригуб

Построено аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности для гнездового очага с увеличивающимся во времени радиусом. Проанализированы численные результаты.

**1. Постановка задачи.** Изучение нестационарного температурного поля самонагревания сырья гнездовым сферическим очагом проводилось в работах [1–2], причем рассматривалась шаровидная область конечного радиуса, в центре которой мгновенно возникал сферический очаг определенного радиуса.

В отличие от названных публикаций, далее будем считать, что возникший очаг не мгновенно приобретает свои граничные размеры, а постепенно нарастая стремится к ним. Это предположение имеет более реальную химико-биологическую основу развития очага самонагревания.

Как и в работах [1–2] при описании центрально–симметричного температурного поля исходим из дифференциального уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right)T = \frac{q(r)}{\varrho c}\,\omega(t) . \qquad (1)$$

Здесь $T(r,t)$ – избыточная температура самонагревания; $a=\lambda/(\rho c)$; $\lambda$ – коэффициент теплопроводности сырья; $\rho$, $c$ – его плотность и удельная теплоемкость; $r$ – расстояние от центра очага до расчетной точки; $t$ – время; $q(r)$ – плотность термоисточников в очаге; $\omega(t)$ – функция Хевисайда.

В качестве начального и граничного условий при решении уравнения (1) примем

$$T(r,0)=0; \qquad T(R,t)=0, \qquad (2)$$

что соответствует идеальному теплообмену на внешней сферической поверхности радиуса $R$.

**2. Построение решения.** Как и в работе [2], его ищем в виде тригонометрического ряда

$$T(r, t) = \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right), \tag{3}$$

который удовлетворяет граничному условию.

Подставив разложение (3) в уравнение (1) получаем дифференциальные уравнения для неизвестных функций $b_n(t)$

$$\dot{b}_n + \frac{a n^2 \pi^2}{R^2} b_n = \frac{2\omega(t)}{R \varrho c} \int_0^R r\, q(r) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) dr. \tag{4}$$

Здесь точка означает дифференцирование по t.

Приняв плотность распределения термоисточников в очаге постоянной и равной $q_0$, а вне его равной нулю, вычисляем интеграл в уравнении (4)

$$\int_0^{S(t)} r \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) dr = \frac{R}{n\pi}\left[\frac{R}{n\pi}\sin\left(\frac{n\pi S(t)}{R}\right) - S(t)\cos\left(\frac{n\pi S(t)}{R}\right)\right]. \tag{5}$$

Здесь $S(t)$ – функция изменения радиуса очага во времени.

Решая уравнение (4) с учетом (5) при нулевом начальном условии (2) находим $b_n(t)$, а затем и само решение. Согласно (3) им является

$$T(r,t) = \frac{2q_0}{\pi \varrho c r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \int_0^t e^{-A_n(t-u)} \left[\frac{R}{n\pi}\sin\left(\frac{n\pi S(u)}{R}\right) - S(u)\cos\left(\frac{n\pi S(u)}{R}\right)\right] du. \tag{6}$$

Здесь $A_n = \frac{a n^2 \pi^2}{R^2}$.

В общем случае (при произвольных $S(u)$) интеграл по $u$ в выражении (6) не берется аналитически, поэтому вычислять его предлагается численно.

В качестве примера рассмотрим случай нарастания радиуса очага самонагревания по закону

$$S(t) = r_0 \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(\xi t). \tag{7}$$

Здесь $r_0$ – верхняя граница радиуса очага самонагревания; $\xi$ –

параметр, характеризующий скорость увеличения очага.

Предельный переход $\xi \to \infty$ в формуле (7) дает вариант мгновенно включенного квазистационарного термоисточника, изученного в работе [2].

**3. Результаты расчетов.** В качестве сырья принимаем травяную муку ($\lambda$=0,09 Вт/(мК); $\rho c$=8,5·10$^5$ Дж/(м$^3$К) [3] ).

Рассмотрим изменения температуры в центре очага самонагревания. В таблице 1 указаны значения T(0,t) в $^0$C полученные при $q_0$=100 Вт/м$^3$, R=3 м, $r_0$=0,3 м и различных t и $\xi$. При вычислениях в рядах удерживалось по 100 членов. Вариант, когда $\xi=\infty$, заимствован из публикации [2].

**Таблица 1 – Значения T(0,t) в $^0$C, вычисленные при различных $\xi$ и t**

| t, сут | $\xi$=0,01 сут$^{-1}$ | $\xi$=0,1 сут$^{-1}$ | $\xi$=1 сут$^{-1}$ | $\xi$=100 сут$^{-1}$ | $\xi=\infty$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,00 | 0,11 | 3,43 | 9,43 | 9,68 |
| 5 | 0,02 | 2,81 | 17,47 | 25,73 | 25,96 |
| 10 | 0,14 | 7,83 | 26,12 | 32,08 | 32,22 |
| 25 | 1,14 | 20,13 | 35,39 | 38,37 | 38,43 |
| 50 | 3,75 | 29,97 | 40,13 | 41,71 | 41,74 |
| 100 | 10,70 | 37,56 | 42,32 | 43,12 | 43,13 |
| 200 | 21,87 | 42,35 | 45,39 | 45,77 | 45,78 |

Из таблицы 1 видно, что при увеличении параметра $\xi$, избыточная температура растет быстрее, стремясь к значениям, соответствующим $\xi=\infty$. Анализируя результаты вычислений, можно сделать вывод, что для t > 50 / $\xi$ можно не учитывать эволюцию очага, а считать его квазистационарным и для расчета применять ряд ускоренной сходимости, построенный в работе [2].

Теперь рассмотрим изменения температуры в окрестностях очага. В таблице 2 указаны значения T(r,t) в $^0$C, полученные при тех же параметрах и различных t и r. Причем, в числителе указаны значения из работы [2] ($\xi=\infty$), а в знаменателе найдены при $\xi$=1 сут$^{-1}$ по формулам (6) и (7). Из таблицы 2 видно, что для значений t > 50 сут температуры не только в центре очага, а и вне его, близки к тому, что дает теория квазистационарного теплового источника. Таким образом, соблюдение неравенства $\xi \cdot t > 50$, можно считать условием применимости теории квазистационарного источника.

Таблица 2 – Значения T(r,t) в °С, вычисленные при различных вариантах развития очага самонагревания

| t, сут | r = 0,3 м | r = 0,6 м | r = 0,9 м |
|---|---|---|---|
| | числитель – $\xi=\infty$, знаменатель – $\xi=1$ сут$^{-1}$ | | |
| 1 | $\frac{3.86}{0,01}$ | $\frac{0.00}{0,00}$ | $\frac{0.00}{0,00}$ |
| 5 | $\frac{12.19}{5,27}$ | $\frac{1.16}{0,24}$ | $\frac{0.00}{0,01}$ |
| 10 | $\frac{16.79}{11,42}$ | $\frac{3.02}{1,54}$ | $\frac{0.50}{0,18}$ |
| 25 | $\frac{22.12}{19,25}$ | $\frac{6.40}{5,13}$ | $\frac{2.13}{1,55}$ |
| 50 | $\frac{25.20}{23,65}$ | $\frac{8.91}{8,09}$ | $\frac{3.90}{3,42}$ |
| 100 | $\frac{27.51}{26,72}$ | $\frac{10.98}{10,53}$ | $\frac{5.64}{5,34}$ |
| 200 | $\frac{29.12}{28,74}$ | $\frac{12.50}{12,28}$ | $\frac{7.01}{6,86}$ |

## ЛИТЕРАТУРА

1 Абрамов Ю.А., Откидач Д.Н., Кирочкин А.Ю. К математическим моделям очагов самонагревания в зерновой насыпи при хранении // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. – Юбилейный выпуск. – Харьков: ХИПБ, 1998. – С 59 – 68.

2 Ольшанский В.П., Тригуб В.В. К расчету температуры самонагревания сырья гнездовым сферическим очагом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сб. науч. тр. – Вып.118. – Харьков: ХГПУ, 2000. – С. 43 – 45.

3 Вогман Л.П., Горшков В.И., Дегтярев А.Г. Пожарная безопасность элеваторов. – М.: Стройиздат, 1993. – 288 с.