

062

X-23

Министерство образования Украины

ISSN 0453-7998
ISSN 0234-5110

ВЕСТНИК

Харьковского государственного
политехнического университета
Выпуск № 118



**НОВЫЕ
РЕШЕНИЯ В
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Харьков
2000г.

УДК 614.84:664

К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОНАГРЕВАНИЯ СЫРЬЯ ГНЕЗДОВЫМ СФЕРИЧЕСКИМ ОЧАГОМ

В.П.Ольшанский, В.В.Тригуб

The paper presents an analytic solution for the non-stationary heat conductivity problem as a trigonometric series. The solution allows to determine the excessive temperature in the site area if its parameters are known. The solution was caused to converge quickly. Numeric results were analyzed.

Постановка задачи. Изучение нестационарного температурного поля самонагревания сырья гнездовым сферическим очагом проводилось в работах [1-4], причем в публикациях [1-3] рассматривалась модель бесконечной насыпи, а в публикации [4] рассматривалась шаровидная область конечного радиуса, в центре которой был очаг такой же формы. Предполагалось, что на внешней сферической поверхности нет теплообмена насыпи с окружающей средой.

В отличие от последней публикации, далее будем считать, что на внешней сферической поверхности происходит идеальный теплообмен с окружающей средой, т.е. избыточная температура, порожденная внутренним термоисточником на указанной поверхности, равна нулю. Выбор таких граничных условий позволяет, во-первых, построить простое решение задачи в форме тригонометрического ряда, а не в виде ряда по функции Бесселя, который получен в статье [4]. Во-вторых, он позволяет ускорить сходимость разложения, т.е. преобразовать его к виду удобному для вычислений. В-третьих, выбранным граничным условиям легко дать физическое истолкование. Вследствие низкой теплопроводности, в точках, значительно удаленных от сферического очага, на начальном этапе самонагревания не успевают прогреться сырье, т.е. избыточная температура в них равна (или близка к) нулю. Это позволяет образовать из таких точек условную граничную сферическую поверхность с нулевой избыточной температурой. Иными словами для изучения поля температур в локализованном сферическом очаге и его окрестности на начальном этапе самонагревания предлагается выделять в сырье сферическую область, с нулевой избыточной температурой на границе. Чем больше радиус этой области, тем на более длительном промежутке времени может вычисляться температура в ее центральной части. В реальных условиях самонагревания в качестве радиуса приходится брать кратчайшее расстояние от центра очага до границы насыпи. Поэтому излагаемый метод расчета годится лишь для случаев, когда очаг находится в глубине насыпи.

Как и в работах [1-4] при описании центрально-симметричного температурного поля исходим из дифференциального уравнения

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

Здесь $T(r,t)$ - избыточная температура самонагревания; $a = \lambda / (\rho c)$; λ - коэффициент теплопроводности сырья; ρ, c - его плотность и удельная теплоемкость; r - расстоя-

ние от центра очага до расчетной точки; t - время; $q(r)$ - плотность термоисточников в очаге; $\omega(t)$ - функция Хевисайда.

Обозначив через R радиус внешней сферической поверхности, содержащий очаг, решение уравнения (1) построим при следующих начальном и граничном условиях $T(r,0)=0; \quad T(R,T)=0. \quad (2)$

Построение решения. Зададим его в виде ряда

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

который удовлетворяет граничному условию.

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

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

Здесь точка означает дифференцирование по t .

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

$$T(r,t) = \frac{2R\omega(t)}{\pi^2 \lambda r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(1 - e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \right) \int_0^R r q(r) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) dr \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \quad (5)$$

Ряд (5) не позволяет вычислить температуру в центре очага, т.е. при $r=0$. Раскрыв неопределенность типа $0/0$ в этой точке получаем

$$T(0,t) = \frac{2\omega(t)}{\pi \lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(1 - e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \right) \int_0^R r q(r) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) dr, \quad (6)$$

Коэффициентируем общие разложения (5), (6), задав плотность распределения термоисточников в очаге. Следуя работе [4] в качестве такой примем

$$q(r) = \begin{cases} q_0 & \text{при } r \leq r_0 \\ 0 & \text{при } r_0 \leq r \leq R. \end{cases}$$

Здесь r_0 - радиус очага самонагревания.

Выполнив интегрирование по частям для вычисления избыточной температуры получаем ряды

$$T(r,t) = \frac{2q_0 R^2}{\pi^3 \lambda \gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left(1 - e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \right) f_n(r_0, R) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \quad (7)$$

$$T(0,t) = \frac{2q_0 R}{\pi^2 \lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(1 - e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \right) f_n(r_0, R),$$

$$\text{где: } f_n(r_0, R) = \frac{R}{\pi n} \sin\left(\frac{n\pi r_0}{R}\right) - r_0 \cos\left(\frac{n\pi r_0}{R}\right)$$

Для удобства расчетов преобразуем решение (7) Убыстрение сходимости рядов. Представим выражение (7) в виде

$$T(r,t) = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[S(r) - \frac{2R^2}{\pi^3 \gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} f_n(r_0, R) \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \quad (8)$$

$$T(0,t) = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[S(0) - \frac{2R}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} f_n(r_0, R) \right],$$

$$\text{где: } S(r) = \frac{2R^2}{\pi^3 \gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} f_n(r_0, R) \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right)$$

$$S(0) = \frac{2R}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} f_n(r_0, R),$$

Наиболее медленно сходится ряд для $S(r)$. Поэтому его желательно просуммировать аналитически. Это легко сделать, если учесть, что [5]

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n^3} = \frac{1}{12} (x^3 - 3\pi x^2 + 2\pi^2 x), \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^4} = \frac{\pi^4}{90} - \frac{\pi^2 x^2}{12} + \frac{\pi x^3}{12} - \frac{x^4}{48}$$

Использование сумм (9) дает замкнутое выражение

$$S(r) = \frac{r_0}{3} \begin{cases} \left(\frac{3}{2} \frac{1}{r_0^2} \frac{r_0}{R} \right) & \text{при } 0 \leq r \leq r_0 \\ \left(\frac{r_0}{r} \frac{r_0}{R} \right) & \text{при } r_0 \leq r \leq R \end{cases} \quad (10)$$

Решения в форме (8), (10) сходятся быстрее, нежели разложения (7). Кроме того, они позволяют установить граничное значение избыточной температуры $T_{гр}$. Устремив $t \rightarrow \infty$ из решений (8), (10) получаем

$$T_{гр} = \frac{q_0 r_0^2}{3\lambda} \left(\frac{3}{2} - \frac{r_0}{R} \right).$$

Разумеется, что $T_{гр}$ имеет чисто теоретический смысл. Оно получено для условной сферической области и не относится к силосам цилиндрической и прямоугольной форм,

которые встречаются на практике. Эта формула может использоваться лишь для проверки правильности вычислений $T(r,t)$, поскольку $T(r,t) < T_{гр}$.

Таблица 1.

Значения $T(0,t)$ в $^{\circ}\text{C}$, вычисленные при различном числе членов в рядах.

t, сут	N=1	N=5	N=10	N=50	N=100
	Формулы (8) – числитель, (8), (10) – знаменатель				
10	0,14	5,58	19,23	32,22	32,22
	44,16	34,34	32,27	32,22	32,22
50	0,65	12,98	28,70	41,74	41,73
	44,67	41,74	41,74	41,74	41,74
100	1,21	15,37	31,09	44,13	44,12
	45,22	44,13	44,13	44,13	44,13
200	2,05	17,08	32,80	45,84	45,83
	46,00	45,84	45,84	45,84	45,84

Результаты расчетов. Они получены для насыпи травяной муки ($\lambda=0,09$ Вт/(мК); $\rho c=8,5 \cdot 10^5$ Дж/(м³К) [1]).

В таблице 1 указаны значения $T(0,t)$ в $^{\circ}\text{C}$ полученные при $q_0=100$ Вт/м³, $R=5$ м, $r_0=0,3$ м и различных t . При вычислениях в рядах удерживалось по N членов. Расчет показывает, что до убыстрения сходимости ряд (8) сходится медленно, особенно в начальный период самонагрева. Для получения погрешности менее 1% в них приходится удерживать около 50 членов ряда. В рядах ускоренной сходимости (8), (10), исключая малые t , хорошая точность достигается при удержании в них 5 членов.

Таблица 2.

Значения $T(0,t)$ в $^{\circ}\text{C}$, вычисленные при $R=1,5$ м.

t, сут	$r=0$ м	$r=r_0=0,3$ м	$r=2r_0=0,6$ м	$r=3r_0=0,9$ м
1	9,69	3,86	0,00	0,00
5	25,96	12,19	1,16	0,00
10	32,22	16,79	3,02	0,50
25	38,43	22,12	6,40	2,11
50	41,61	25,05	8,70	3,85
100	43,10	26,45	9,82	4,33
200	43,33	26,66	10,00	4,44

Таблица 3.

Значения $T(0,t)$ в $^{\circ}\text{C}$, вычисленные при $R=3$ м.

t, сут	$r=0$ м	$r=r_0=0,3$ м	$r=2r_0=0,6$ м	$r=3r_0=0,9$ м
1	9,68	3,86	0,00	0,00
5	25,96	12,19	1,16	0,00
10	32,22	16,79	3,02	0,50
25	38,43	22,12	6,40	2,13
50	41,74	25,20	8,91	3,90
100	43,13	27,51	10,98	5,64
200	45,78	29,12	12,50	7,01

В таблицах 2 и 3 указаны значения $T(r,t)$ в $^{\circ}\text{C}$ полученные при $q_0=100$ Вт/м³ и различных t и r . Причем в таблице 2 даны значения при $R=1,5$ м, а в таблице 3 значения при $R=3$ м. Из данных таблиц можно сделать вывод, что на расчетном интервале времени (до 200 суток) увеличение R слабо влияет на вычисление $T(r,t)$, особенно в центре очага, где прирост температуры максимален. Это подтверждает возможность достаточно произвольно (в смысле радиуса) выделить в массиве насыпи шаровидную область со сферическим очагом в ее центральной части и проводить

расчет избыточной температуры в очаге на начальном этапе самонагрева при нулевом приросте температуры на границе выделенной из массива области.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Сергунов В.С. Дистанционный контроль температуры зерна при хранении. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1987. – 173 с.

3. Ольшанский В.П. Формула прироста температуры при гнездовом самонагревании сырья // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сб. науч. тр. – Вып. 75. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 98–104.

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

5. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981. – 800 с.

УДК 535.214.4:614.841

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ИК – ДИАПАЗОНЕ

Н.И. Иванов, Е.П. Иванова, В.Г. Толубенко

The current situation and development tendencies for methods and technical automatic facilities for thermal fields control and detection of spontaneous ignition sites in grain elevators are presented. A measuring plant for cereal crops radiating power was developed. Emissivities for grain radiation were measured within the 20 – 30 micrometer band.

Анализ статистических данных о пожарах и взрывах на элеваторах за последние годы свидетельствует о том, что более чем в 25 % всех случаев они происходят вследствие самовозгорания зернового сырья в силосах и бункерах. Аварии, связанные с этой причиной, зачастую приводят к гибели людей и тяжелым разрушительным последствиям [1].

Существующие способы и средства обнаружения очагов самовозгорания при хранении зерна в силосах не позволяют с достаточной точностью определить место возникновения пожара, а лишь свидетельствуют о наличии его, да и то с большим опозданием. В настоящее время на основе измерения различных параметров очагов самовозгорания (температуры, состава газовой среды, изменения относительной влажности воздуха и влажности зерна, а также его электрических и других свойств) разработаны различные методы их обнаружения на ранней стадии: термометрический, газоаналитический, электрометрический и др. [1, 2, 3]. Однако, наиболее широкое распространение получил способ температурного контроля, очевидно по причине того, что температура является наиболее информативным параметром состояния зерновой массы и характеристикой качества хранящейся продукции.

На элеваторах и зерноперерабатывающих предприятиях применяются более 250 систем термометрии типов МАРС – 1500, ДКТЭ – 4МГ, УДКТ – 1200, М – 1500 и др., разработанные еще в 60-х годах. Из-за своего физического износа они не соответствуют сегодня требованиям к уровням надежности, точности и оперативности контроля температурных состояний продукции в силосах и требуют повышения эксплуатационных затрат для поддержания их работоспособности.

Новые разработки в области контроля температурного режима зерновой насыпи направлены на совершенствование схем размещения термодатчиков в зернохранилищах [3], а также структурных, функциональных и электрических схем самих установок, полную автоматизацию процессов контроля, накопления, хранения, отображения информации с учетом последних достижений измерительной и

вычислительной техники [4, 5]. При этом все до сих пор используемые, проектируемые и разрабатываемые системы температурного контроля основаны на контактных методах измерения и в качестве первичных датчиков температуры в них применяются термоэлектропреобразователи (термопары, термисторы, терморезисторы), которые зачастую оказываются неэффективными вследствие низкой теплопроводности зерна. Основными недостатками данных систем являются:

- неполная информация о пространственном распределении температуры по объему контролируемой зерновой массы, обусловленная регистрацией температуры в локальной точке контакта;

- увеличение числа датчиков для получения приемлемой разрешающей способности по объему контролируемого сырья, что приводит к снижению надежности аппаратуры, а также к ее удорожанию;

- возможные обрывы термоподвесок и закрепленных на них датчиков из-за воздействия больших динамических нагрузок при загрузке и выгрузке зерна;

- громоздкость и металлоемкость термоподвесок;

- низкая точность измерений из-за интегрирующего влияния наружной оплетки на измеряемую термочувствительными элементами температуру и затрудненной теплопередачи от объекта контроля к датчику;

- повышенное энергопотребление за счет одновременного включения большого числа местных блоков на длительное время при проведении контроля температуры.

В связи с этим авторами работы предпринята попытка разработки нового метода и измерительной аппаратуры бесконтактного дистанционного измерения температурных полей и обнаружения очагов самовозгорания зерна в силосах элеваторов.

Для реализации данного метода необходимо знать излучательную способность зерна в различных диапазонах длин волн. Высокочувствительные детекторы теплового излучения, описанные в [6], позволяют проводить спектральный анализ излучательной способности: $\alpha = T_{\lambda} / T$ (T_{λ} и T

Содержание

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	2
Синтез структуры математической модели технологического процесса электроимпульсно – вибрационного метода очистки воды и промышленных стоков В.П. Шпачук, А.В. Луцик, Е.А. Черкашина	2
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	4
Выделение связанных областей на изображении с использованием теории нечетких множеств В.В. Ляшенко	4
Локально-параллельные однородные алгоритмы нечетких операций, основанных на процедурах сложения, вычитания и сравнения О.Ф. Михаль	6
Применение метода бинаризации предикатов для изучения морфологии на примере имен прилагательных А.В. Пронюк	9
Математическая модель задачи синтеза топологии централизованных информационных сетей В.В. Бескоровайный, Э.А. Имангулова	11
Обеспечение надежности летной эксплуатации несущей системы вертолетов В.В. Буланов, А.Г. Волов, А.Г. Дибир	14
МАШИНОСТРОЕНИЕ	17
Базовая математическая модель горизонтальной динамики локомотива В.Г. Маслиев, С.А. Калинина, Д.И. Якунин	17
Анализ возможных способов регулирования тормозных сил на автотранспортных средствах В.А. Богомолов, В.И. Кирчатый	20
Експериментальні дослідження витрат при роботі рідиноохолоджуючих барабанів М.Л. Рябчиков, К.С. Хасанова	23
Алгоритм управления поперечной подачей заточного станка ЗВ624 Ф.М. Евсюкова, О.В. Евсюкова, А.Ф. Еникеев, И.Р. Зыков, Л.А. Шищенко	24
Силовые параметры процесса обработки закаленного чугуна фрезами с СТМ Р.В. Гузенко, В.В. Соловьев, С.Л. Миранцов	26
Выбор вариантов компоновки агрегатного станка на основе комплексного показателя компактности А.А. Пермяков	28
Возможные пути снижения энергозатрат при электроплавке чугуна Т.В. Запорожченко	30
Регулирование тормозных сил на трехосных АТС категории М3 В.А. Богомолов, В.И. Кирчатый	31
Оценка влияния комплексного силикостронциевого модификатора на структуру и свойства чугуна И.А. Болотова, Д.А. Демин	34
Проблемы формирования качества поверхностных слоев деталей и инструментов В.Б. Тарельник	35
Метод квазигармонических многофакторных экспериментов при исследовании процесса резания материалов В.Л. Доброскок	38
ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	41
Десорбция аммиака в дистиллере содового производства В.М. Фрумин	41
ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	43
К расчету температуры самонагрева сырья гнездовым сферическим очагом В.П. Ольшанский, В.В. Тригуб	43