

4. Родатин К.Ф., Полгарский А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Сандуляк А.В., Ткаченко С.И. Систематизация данных по магнитной обработке воды в теплоэнергетике. - Известия вузов. Энергетика, 1980, № 4.
6. Система технического обслуживания и ремонта теплотехнического оборудования (СТОИРТО). - Мн.: ВНИИТМЖ, 1990.
7. Тебенхин В.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Химическая очистка топочного и водного пространства котлов на газовом и жидком топливе, теплотехнические измерения котлов, регулировка топочных устройств. Доклад. - Будапешт: Топливо-техническое предприятие «Прометус», 1985.

УДК 635.21.027:621.635

Е.М. Заяц, М.М. Николаенко, И.Б. Ющенко, кандидаты технических наук;

П.В. Кардашов, Е.Е. Заяц, инженеры

### ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В СРЕДЕ, ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ ТОКОПРОВОДИЯЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Электрохимическая и тепловая обработка органических материалов при технологических температурах, близких к предельно допустимым, требует высокую равномерность температурных полей в обрабатываемой среде. Кроме того температура влияет на физические, химические и биологические процессы, глубина и качество которых взаимосвязаны с равномерностью температуры в зоне обработки.

Причинами различной температуры могут быть неоднородность электрических и теплофизических свойств по объему материала, неравномерность полей и скорости перемещения компонентов или частей материала в рабочей камере. Предварительная подготовка должна формировать обрабатываемый материал однородным по физическим свойствам. Форма и взаимное расположение токопроводящих электродов должны создавать равномерное перемещение материала в равномерном электрическом поле.

В практике наиболее распространены электродные системы в виде плоской или коаксиальной трубы (рис. 1.1).

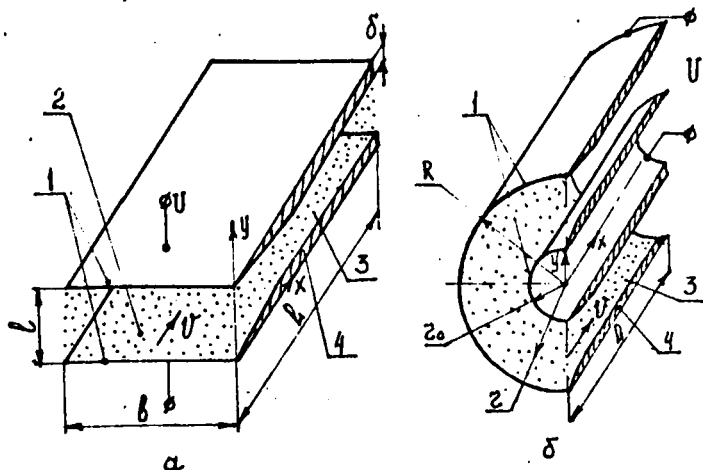


Рис.1. Схемы к расчету температурного поля плоской (а) и коаксиальной (б) электродных систем:

1 — токоподводящие электроды; 2 — кормовая смесь;  
3 — ядро; 4 — пограничной.

Рассмотрим температурное поле таких систем при наличии внутреннего источника теплоты с учетом зависимости физических параметров среды от температуры и условий движения. Поток движущейся среды разделим на две области: ядро - составляющее основную часть материала, в котором отсутствует зависимость  $\nu(y)$  и скорость  $v$  частиц постоянна, и пристенную - так называемый пограничной - для которого характерны прилипание отдельных частиц корма к электродам и наличие зависимости  $\nu(y)$  и  $\nu(y)$ .

## Плоские электроды (рис. 1.а).

Уравнение теплопроводности для рассматриваемой задачи имеет вид

$$\frac{\partial \cdot \partial t(x, y)}{\partial x} = \frac{a \cdot \partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\rho_c \cdot C_c} \quad \text{или} \quad \frac{\partial t(x, y)}{\partial x} = \frac{a}{\vartheta} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\rho_c \cdot \vartheta \cdot C_c}, \quad (1)$$

где  $t$  - текущая температура среды, °С;

$a$  - температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;

$q_v$  - объемная плотность внутреннего источника теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;

$v$  - скорость перемещения среды, м/с.

Граничные условия имеют вид

$$t(0, y) = t_n, \quad \nabla t(y=0; y=l) = \alpha(t - t_c)/\lambda,$$

где  $t_n$  - начальная температура материала, °С;

$t_c$  - температура окружающей среды, °С.

Пренебрегая членом  $\frac{a}{\vartheta} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$ , учитывающим влияние на ядро потока теплоты из погранслоя, получим уравнение

$$\frac{\partial t(x, y)}{\partial x} = \frac{q_v}{\rho_c \cdot \vartheta \cdot C_c}$$

Таким образом без учета температуры погранслоя для ядра

$$t(x) = \int_0^x \frac{q_v \cdot dx}{\rho_c \cdot \vartheta \cdot C_c} \quad (2)$$

Интегрируя (2) получим

$$t(x) = t_n + \frac{q_v \cdot x}{\rho_c \cdot \vartheta \cdot C_c}$$

Так как  $q_v = \gamma_{tc} \cdot E^2$

$$t(x) = t_n + \frac{\gamma_{tc} \cdot E^2}{\rho_c \cdot \vartheta \cdot C_c} \quad (3)$$

где  $\gamma_{tc}$  - удельная электрическая проводимость кормосмеси при температуре  $t$ , См/м;

$E$  - напряженность электрического поля в кормосмеси, В/м.

Формула (3) описывает распределение температуры в материале без учета влияния температуры погранслоя.

Оценим влияние погранслоя на распределение температуры в ядре по длине электродов. Введем среднюю по сечению материала температуру

$$\bar{t} = \left(\frac{1}{j}\right) \cdot \int_0^j t(x, y) \cdot dy.$$

Интегрируя (1) по  $\left(\frac{1}{j}\right) \cdot \int_0^j dy$  получим

$$\frac{\partial \bar{t}(x)}{\partial x} = -\frac{2 \cdot a \cdot |\nabla t_y|}{1 \cdot \delta} + \frac{q_v}{\rho_c \cdot \delta \cdot C_c}. \quad (4)$$

Множитель 2 возникает из-за влияния теплообмена между двумя электродами и ядром. Знак минус означает противоположную направленность  $\nabla t_y$  и потока теплоты от погранслоя к ядру.

Интегрируя (4) получим

$$\bar{t}(x) = -2 \cdot a / (1 \cdot \delta) \cdot \int_0^x [|\nabla t_y|] \cdot dx + \int_0^x [q_v \cdot dx / (\rho_c \cdot \delta \cdot C_c)]. \quad (5)$$

Для расчета  $\bar{t}(x)$  по (5) необходимо знать  $\nabla t_y$  на расстоянии  $y = \delta$  так как теплообмен идет на границе погранслоя, толщина которого  $\delta$ .

Для подвижного материала в погранслое уравнение энергии имеет вид

$$\frac{\partial_y(y) \cdot \partial t}{\partial y} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\gamma_{tc} \cdot E^2}{\rho_c \cdot C_c}.$$

так как для ядра

$$\frac{\partial_x(x) \cdot \partial t}{\partial x} = \frac{\gamma_{tc} \cdot E^2}{\rho_c \cdot C_c},$$

то 
$$\frac{\alpha}{\delta x} = \frac{\gamma_{\text{те}} \cdot E^2}{\delta_x \cdot \rho_c \cdot C_c},$$

из (6) имеем

$$\frac{\delta(y) \cdot \gamma_{\text{те}} \cdot E^2}{\delta_x \cdot \rho_c \cdot C_c} = \frac{a \cdot \theta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\gamma_{\text{те}} \cdot E^2}{\rho_c \cdot C_c}. \quad (7)$$

Пусть профиль скорости в погранслое определяется по уравнению

$$\delta_x(y) = \frac{\delta_x \cdot y}{\delta(x)}, \quad (8)$$

где  $u_x$  - скорость в ядре, м/с;

$\delta(x)$  - толщина погранслоя, м.

Подставим (8) в (7) и получим

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -\frac{\gamma_{\text{те}} \cdot E^2}{a \cdot \rho_c \cdot C_c} \cdot \left(1 - \frac{y}{\delta}\right). \quad (9)$$

Граничные условия имеют вид

$$t_y = \delta = t(x) = t_x$$

$$\frac{\delta t}{\delta y}|_{y=0} = -\frac{\alpha \cdot (t_x - t_c)}{\lambda}, \quad t_x = t_x(x),$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\lambda$  - теплопроводность среды, Вт/(м·°С);

Введем обозначение

$$\frac{\gamma_{\text{те}} \cdot E^2}{a \cdot \rho_c \cdot C_c} = A,$$

тогда из (9) следует

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -A \cdot \left(1 - \frac{y}{\delta}\right). \quad (10)$$

Интегрируя (10) получим общее решение

$$t(y) = A \cdot y^3/6 \cdot \delta(x) - A \cdot y^2/2 + C_2 + C_1.$$

Используя граничные условия окончательно для погранслоя

$$t(y) = \frac{A \cdot y^3}{6 \cdot \delta(x)} - \frac{A \cdot y^2}{2} - z \cdot t_c + \frac{[t_n(x) + A \cdot \delta^2(x)/3 + z \cdot t_c \cdot \delta(x)] \cdot [z \cdot y + 1]}{1 + z \cdot \delta(x)}, \quad (1f)$$

где  $z = \alpha/\lambda$ .

Профиль температуры в погранслое из (11)

$$[\nabla t_{y=0}] = [-A \cdot \delta(x)/2 - z \cdot t_c + (t_n(x) + A \cdot \delta^2(x)/3 + z \cdot t_c \cdot \delta(x)) \cdot z / (1 + z \cdot \delta(x))]. \quad (1g)$$

Полагая в первом приближении, что температура в ядре

$$t_n \approx t_n + \gamma_{tc} \cdot E^2 \cdot x / (\rho_c \cdot C_c \cdot v),$$

где  $t_n$  - начальная температура материала, °C, из (12) следует

$$[\nabla t_{y=0}] = [-A \cdot \delta / 2 + (t_n - t_c + A \cdot a \cdot x / v + A \cdot \delta^2 / 3) \cdot z / (1 + z \cdot \delta)]. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (5) с учетом  $t(0) = t_n$

$$i(x) = t_n + 2 \cdot a / (1 \cdot v) \cdot [(t_n - t_c + A \cdot a \cdot x / v + A \cdot \delta^2(x)/3) \cdot z / (1 + z \cdot \delta(x)) - A \cdot \delta(x)/2] \cdot (-x) + A \cdot a \cdot x / v. \quad (14)$$

Коаксиальные электроды (рис.1.6)

Уравнение энергии имеет вид

$$t(r, x) = t_n + q(r) \cdot x / (\rho_c \cdot C_c \cdot v), \quad (15)$$

где  $q(r) = \frac{\gamma_{tc} \cdot U^2}{r^2 \cdot \ln^2(R/r_0)}$  (16)

Подставляя (16) в (15) получим распределение температуры между цилиндрическими электродами

$$t(r,x) = t_n + \frac{\gamma_{tc} \cdot U^2 \cdot x}{\rho_c \cdot C_c \cdot U \cdot r^2 \cdot \ln^2(R/r_0)} \quad (17)$$

Средняя температура по сечению коаксиальной электродной системы

$$\bar{t} = \frac{1}{\pi \cdot (R^2 - r_0^2)} \cdot \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot t(r,x) \cdot r \cdot dr \quad (18)$$

Таким образом формулы (11), (14), (17) и (18) позволяют рассчитать температуру кормосмеси в зоне, граничащей с поверхностью электрода и между плоскими и цилиндрическими коаксиальными электродами.

Толщина пограничного слоя может быть определена по известным формулам. Например, для кормовых систем профиль скорости соответствует турбулентному с постоянной величиной в ядре и переменной в пограничном слое. В этом случае толщина пограничного слоя наиболее близко описывается формулой

$$\delta(x) = 3,7 \cdot x \cdot Re^{-0,5}$$

где  $Re$  - число Рейнольдса.

Температура кормовой системы зависит от удельной электрической проводимости, которая в свою очередь зависит от температуры и длины электродов. Эту взаимозависимость должна учитывать методика расчета  $t(x,y)$ .

Результаты расчетов по формулам (11, 14, 17, 18) позволяют сделать следующие выводы:

1. Обработка грубодисперсных кормовых материалов возможна только в плоских электродных системах, создающих равномерное температурное поле (рис. 2).

2. Цилиндрические коаксиальные электроды создают недопустимый перегрев материала у поверхности внутреннего электрода в то время как температура у наружного значительно ниже нормируемой (рис. 3).

3. Обработка жидких кормов возможна в плоских и коаксиальных системах при соответствующем подборе отношений наружного и внутреннего диаметров электродов (табл. 1).

4. Расчет коаксиальных электродных систем по средней температуре ведет к большим погрешностям (рис. 3).

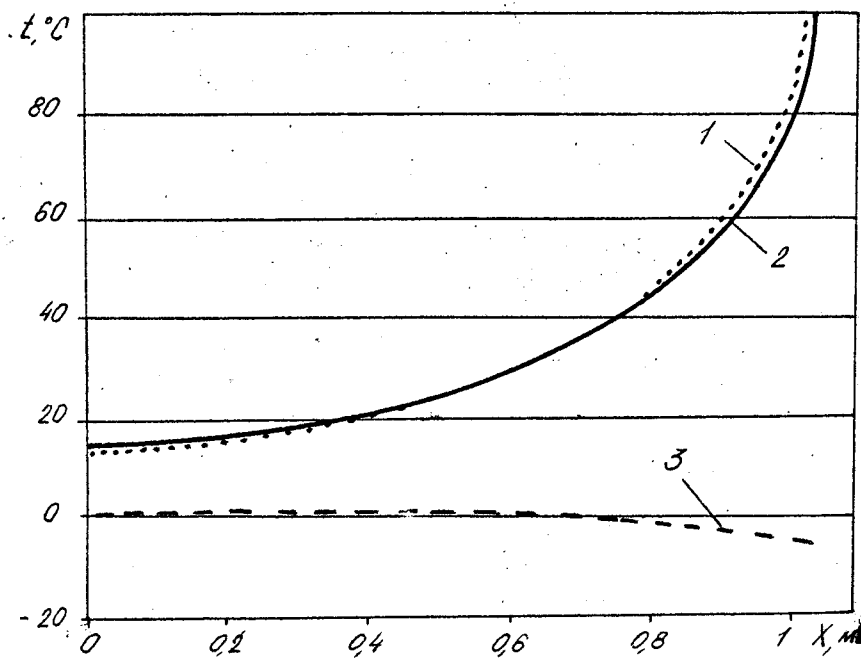


Рис. 2. Изменение температуры по длине плоских электродов  $X$  при обработке содомы:  
 1 - температура поверхности;  
 2 - температура ядра;  
 3 - разность температур.



Таблица 1

Изменение температуры по длине  
цилиндрической коаксиальной системы

Длина электрода, м	Температура, °С			
	Средневзвешанная	электрода		разность
		внутреннего	наружного	
Солома, 600 кг/м <sup>3</sup> , 700 В/м, 0,003 м/с, $t_k \approx 90$ °С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,300	17,0	33,6	15,8	19,7
0,600	25,4	70,3	17,0	53,3
0,850	38,9	128,7	22,0	106,7
Зерно, 400 кг/м <sup>3</sup> , 1400 В/м, 0,003 м/с, $t_k \approx 80$ °С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,050	16,7	23,6	14,4	9,2
0,100	24,6	42,8	18,3	24,5
0,150	40,0	80,5	26,1	54,5
0,170	51,2	108,0	31,7	76,3
Меласса, 1400 кг/м <sup>3</sup> , 4000 В/м, 0,003 м/с, $t_k \approx 60$ °С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,100	15,1	16,5	14,2	2,3
0,200	19,3	22,7	19,2	7,4
0,300	25,5	31,7	21,7	10,0
0,400	35,6	46,3	29,0	17,4
0,500	54,7	74,0	42,6	31,4

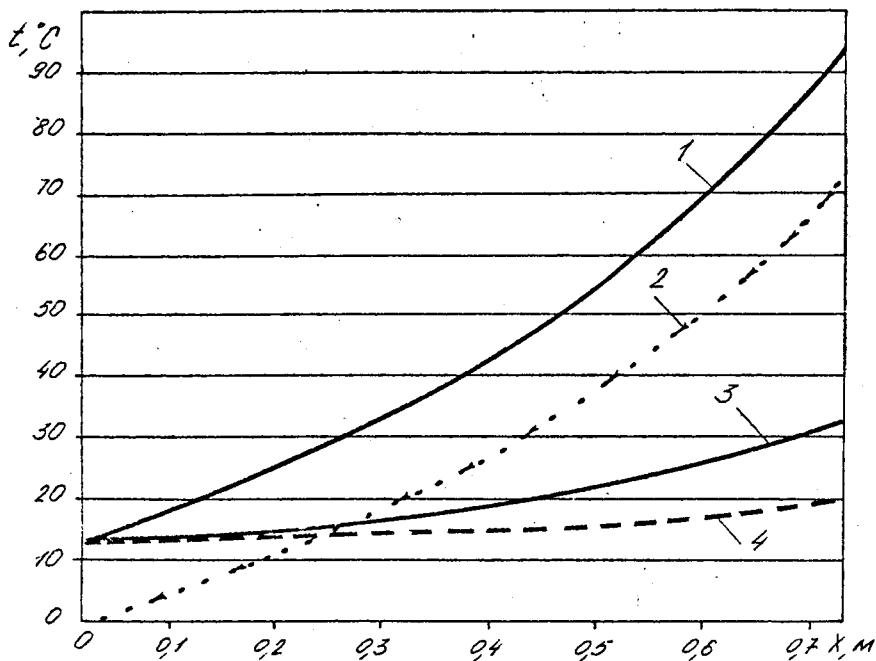


Рис. 8. Изменение температуры по длине коаксиальных электродов X при обработке осломом:  
 температура у внутреннего (1) и наружного (3) электродов;  
 2 - разность (1) и (3);  
 4 - средневзвешенная температура материала.