

Деятельность преподавателя заключается в проектировании учебной деятельности, организации учебной деятельности и управлении учебной деятельностью, а не в «передаче» знаний.

ФГОС–3

# «Основы теории теплообмена»

Рыжков Сергей Витальевич

к.т.н., доцент кафедры теплофизики Э6

(502 Э и 548 л)

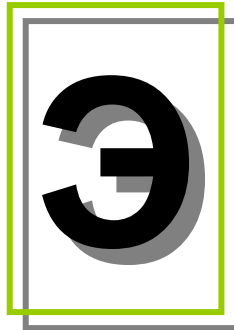
E-mail: [svryzhkov@rambler.ru](mailto:svryzhkov@rambler.ru)

Web sites: <http://energy.power.bmstu.ru/e06/>

<http://www.bmstu.ru/ps/~svryzhkov/>

Модульно-рейтинговая система:

- Контрольные мероприятия
- Лабораторные работы (запись + отработка)
- Домашние задания



## энергомашиностроение.

6

Конечной **целью обучения** является **формирование способа действий**, обеспечивающих осуществление будущей профессиональной деятельности, **но не запоминание знаний**.  
Задача – ориентировать и готовить к жизни в обществе.

# Лекция №1 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

- Основной закон теплопроводности
- Физический смысл дифуравнения теплопроводности
- Распространение теплоты в стенках
- Основы нестационарной теплопроводности
- Теплообмен соприкосновением

# Основной закон теплопроводности

Теплопроводностью называется **процесс распространения теплоты в теле путем непосредственного соприкосновения, между частицами с различной температурой.**

**Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется удельным тепловым потоком:**

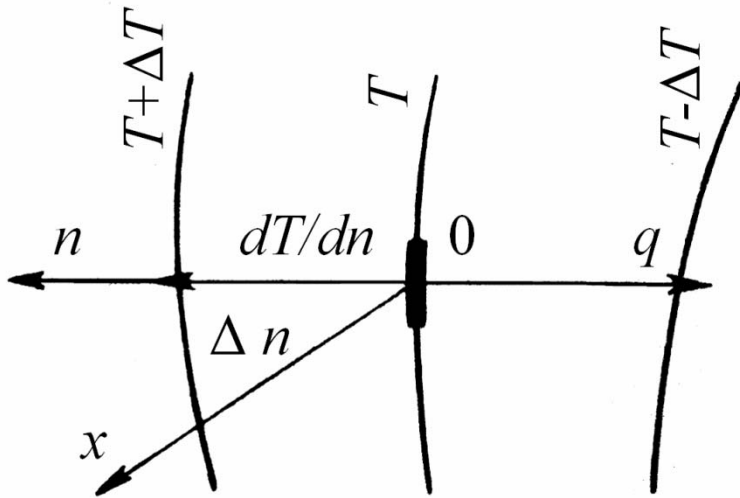


Рис. 1. Изменение температуры в теле (закон Фурье)

$$q = \frac{Q}{F} \quad \text{Вт} / \text{м}^2 \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn}$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

$$\lambda = -\frac{q}{\frac{dT}{dn}} = -\frac{\frac{Q}{F}}{\frac{\Delta T}{\Delta n}} \quad \text{Вт} / \text{м} \cdot \text{град}$$

$$T = f(x, \tau) \quad \lambda_t = \lambda_0(1 + bt)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad \frac{dT}{d\tau} = a \frac{d^2T}{dx^2} \quad (2)$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{d^2T}{dx^2}$$

$$q = \alpha(T_{ст} - T_{жс}) \quad (4)$$

## Ориентировочные значения $\lambda$ для различных веществ

Вещество	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$	Вещество	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$
Газы	0,005 - 0,60	Дерево	0,06 - 0,55
Воздух 0 – 1000 <sup>0</sup> С	0,020 - 0,08	Металлы	2 - 420
Капельные жидкости	0,06 - 0,80	Медь красная	≈ 400
Вода 0 – 100 <sup>0</sup> С	0,15 - 0,29	Алюминий	≈ 210
Строительные и изоляционные материалы	0,02 - 2,9	Железо	≈ 48
Красный кирпич, 0 – 300 <sup>0</sup> С	0,5 - 0,6	Сталь	10 - 60
Минеральная шерсть 0 – 300 <sup>0</sup> С	0,02 - 0,06	Ртуть 0 – 500 <sup>0</sup> С	7 - 88

# Распространение теплоты в однослойной и многослойной стенках

## Однослойная плоская стенка

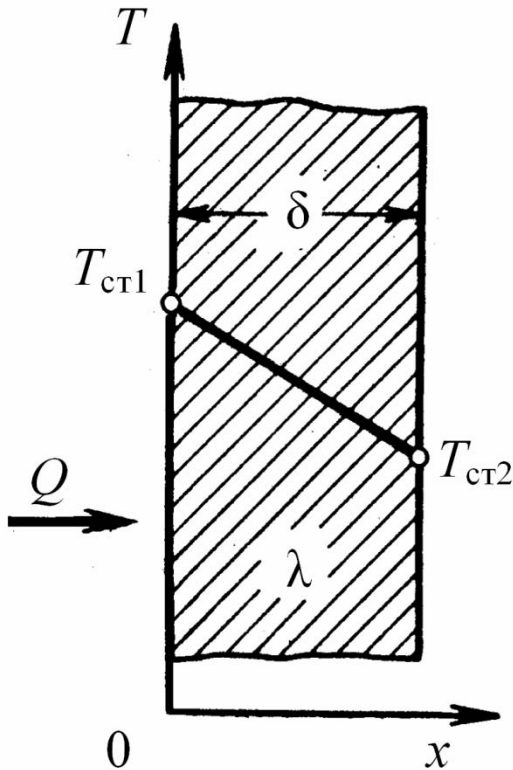


Рис. 2. Теплопроводность в однослойной плоской стенке

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad T = C_1 x + C_2 \quad (5)$$

$$\text{при } x = 0 \quad T = T_{ст1}$$

$$\text{при } x = \delta \quad T = T_{ст2}$$

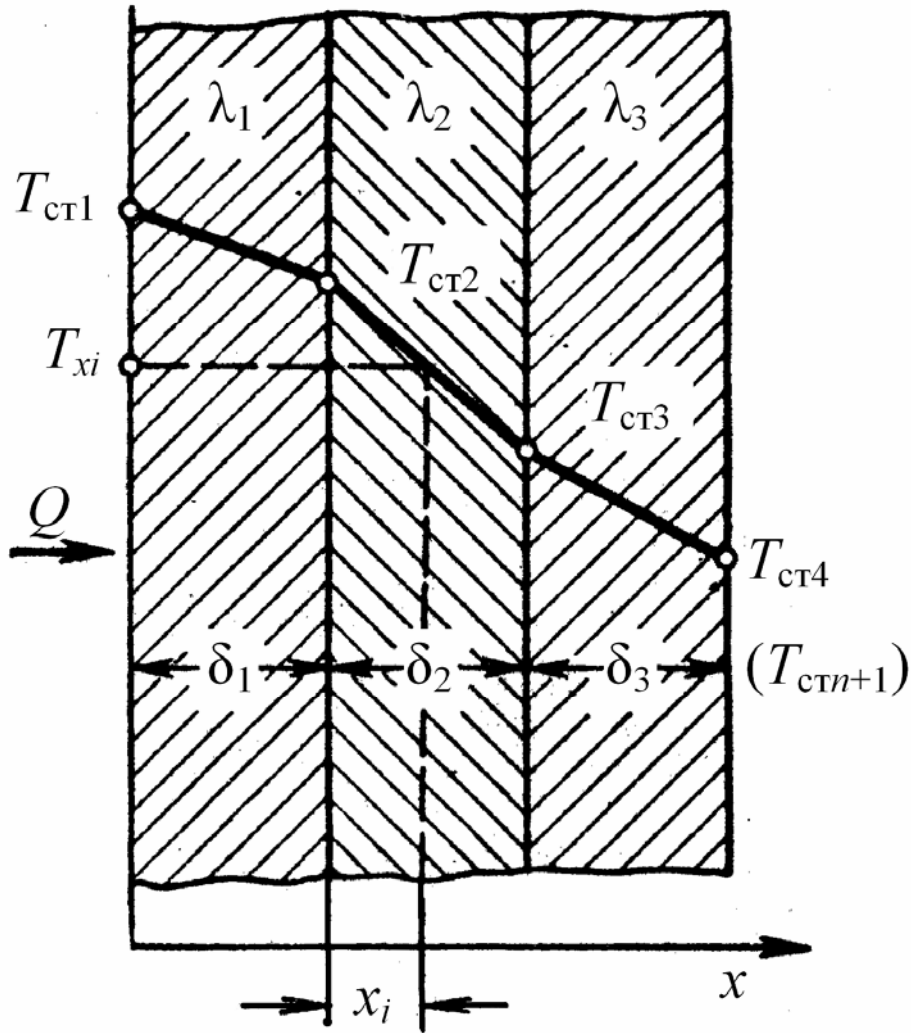
$$T = \frac{T_{ст2} - T_{ст1}}{\delta} x + T_{ст1} \quad (6)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{или} \quad dT = -\frac{q}{\lambda} dx$$

$$T = -\frac{q}{\lambda} x + C \quad q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad (7)$$

Отношение  $\delta/\lambda$  называют термическим сопротивлением стенки, а  $\lambda/\delta$  проводимостью стенки.

# Многослойная плоская стенка



$$\left\{ \begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_{cm1} - T_{cm2}) \\ q &= \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_{cm2} - T_{cm3}) \\ &\dots \\ q &= \frac{\lambda_n}{\delta_n} (T_{cmn} - T_{cm(n+1)}) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{cm1} - T_{cm2} &= q \frac{\delta_1}{\lambda_1} \\ T_{cm2} - T_{cm3} &= q \frac{\delta_2}{\lambda_2} \\ &\dots \\ T_{cmn} - T_{cm(n+1)} &= q \frac{\delta_n}{\lambda_n} \end{aligned} \right.$$

Рис. 3. Теплопроводность в плоской многослойной стенке

$$T_{cm1} - T_{cm(n+1)} = q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right)$$

$$q = \frac{T_{cm1} - T_{cm(n+1)}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{T_{cm1} - T_{cm(n+1)}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (8)$$

**Однослойная цилиндрическая стенка**

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (T_{cm1} - T_{cm2}) \quad (9)$$

**Многослойная цилиндрическая стенка**

$$Q = \frac{2\pi l (T_{cm1} - T_{cm(n+1)})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} \quad (10)$$

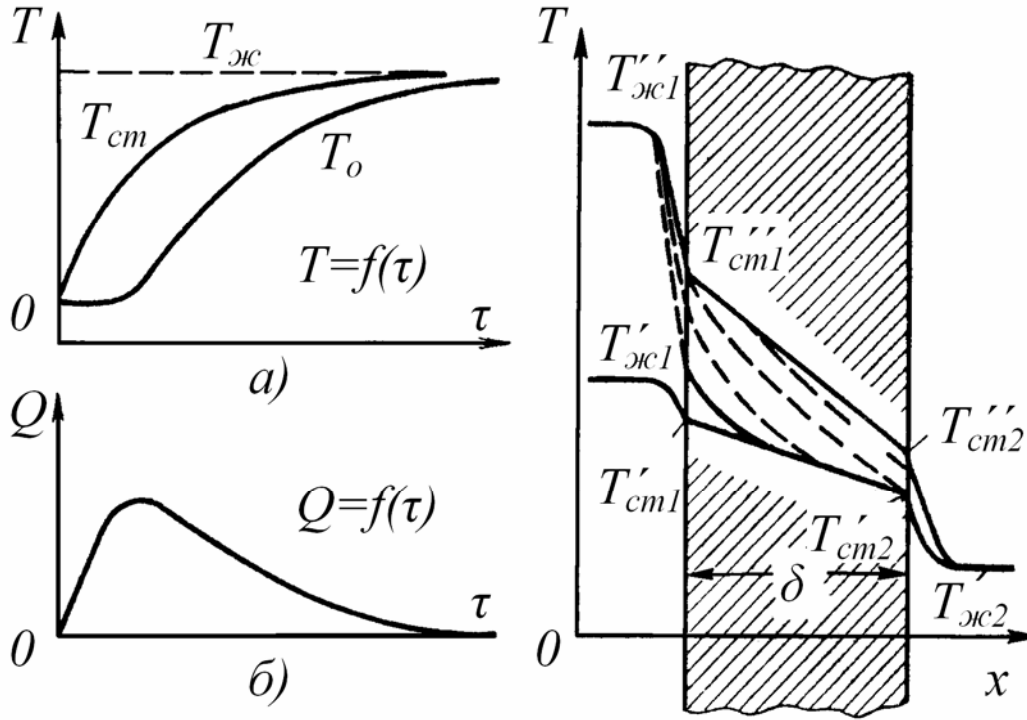
**Однослойная шаровая стенка**

$$Q = \frac{4\pi\lambda}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} (T_{cm1} - T_{cm2}) \quad (11)$$

$$Q = \frac{4\pi\lambda(T_{cm1} - T_{cm2})}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = \frac{2\pi\lambda\Delta T}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} = \pi\lambda\Delta T \frac{d_1 d_2}{\delta}$$

$\delta$  - толщина стенки

# Основы нестационарной теплопроводности



$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{d^2T}{dx^2}$$

$$T = f(x, \tau)$$

$$\frac{T(\tau) - T_{жс}}{T_{нач} - T_{жс}} = \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}_0} = \Theta \quad (12)$$

$$\frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}_0} = f(Bi, Fo, L)$$

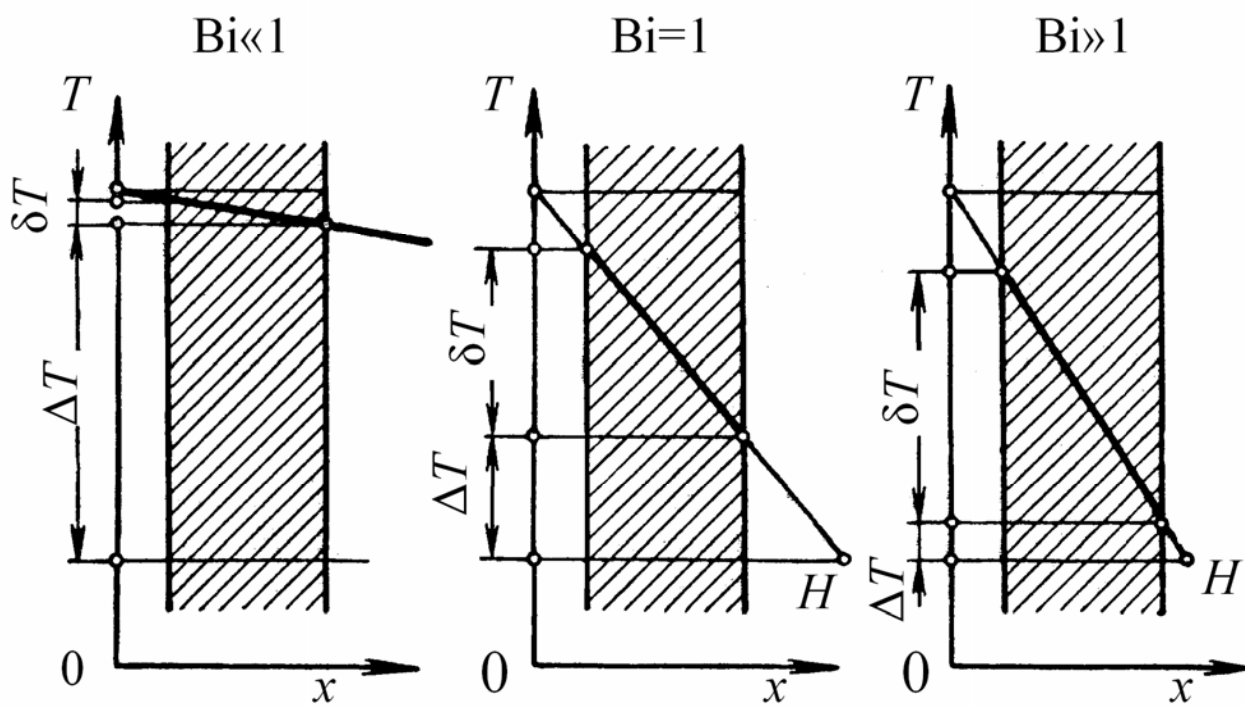
Рис. 4. Зависимость температуры стенки и количества передаваемого тепла от времени

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} - \text{критерий Био}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} - \text{критерий Фурье}$$

$$L = \frac{x}{l} - \text{критерий геометрического подобия}$$

$l$  – характерный размер



$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} l$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} = \frac{\lambda}{c\rho l^3} l^2 \tau$$

Рис. 5. Распределение температуры в сечении стенки

$$\frac{\vartheta_{ст}}{\vartheta_{нач}} = f(Bi, Fo), \frac{\vartheta_0}{\vartheta_{нач}} = f(Bi, Fo)$$

$\vartheta_{ст} = T_{ст} - T_{ж}$  — избыточная температура на поверхности тела

$\vartheta_0 = T_0 - T_{ж}$  — избыточная температура в средней плоскости стенки

$\vartheta_{нач} = T_{нач} - T_{ж}$  — избыточная начальная температура тела

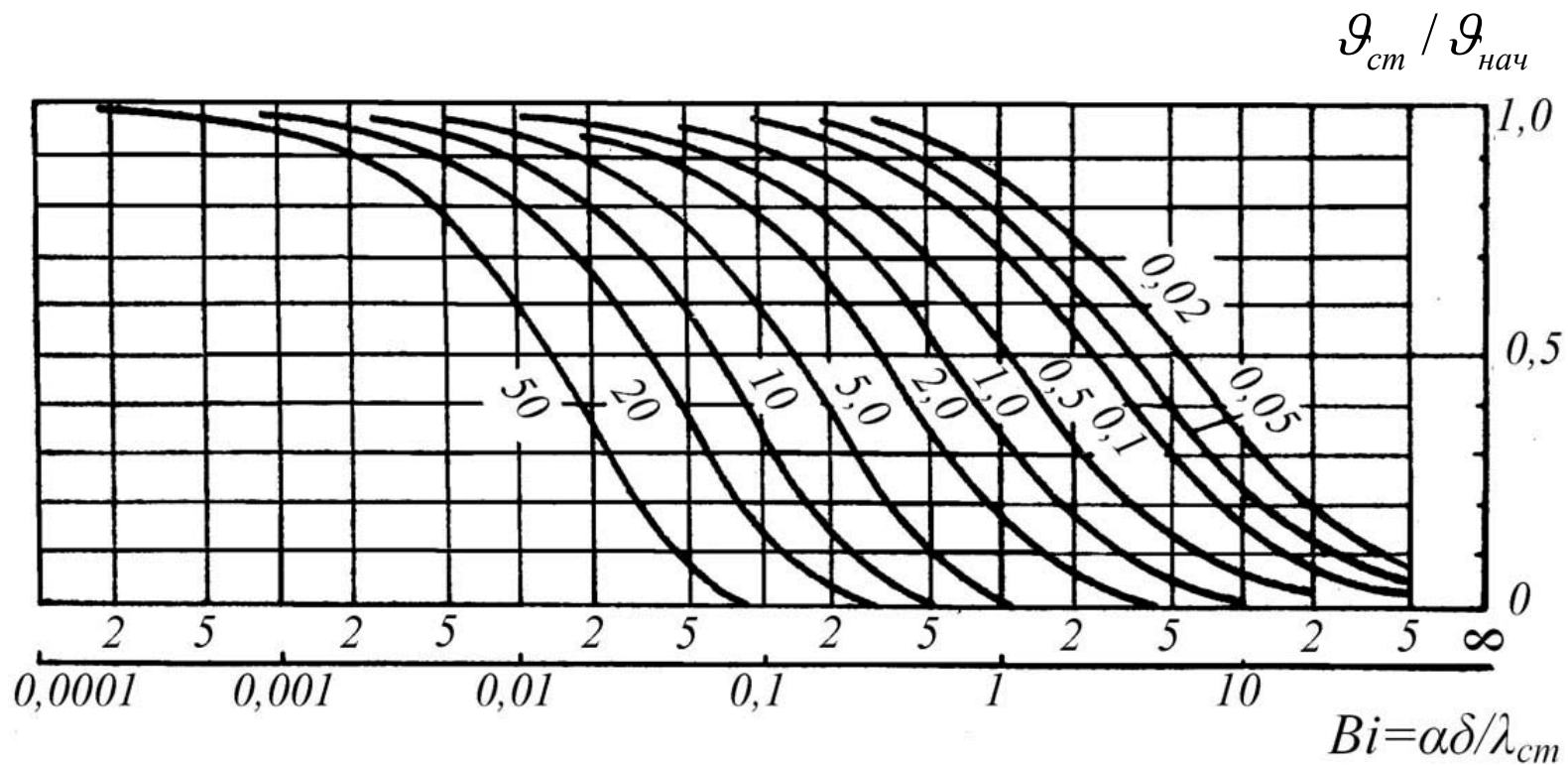


Рис. 6. Зависимости  $\frac{g_{ст}}{g_{нач}} = f(Bi, Fo)$  для плоской стенки

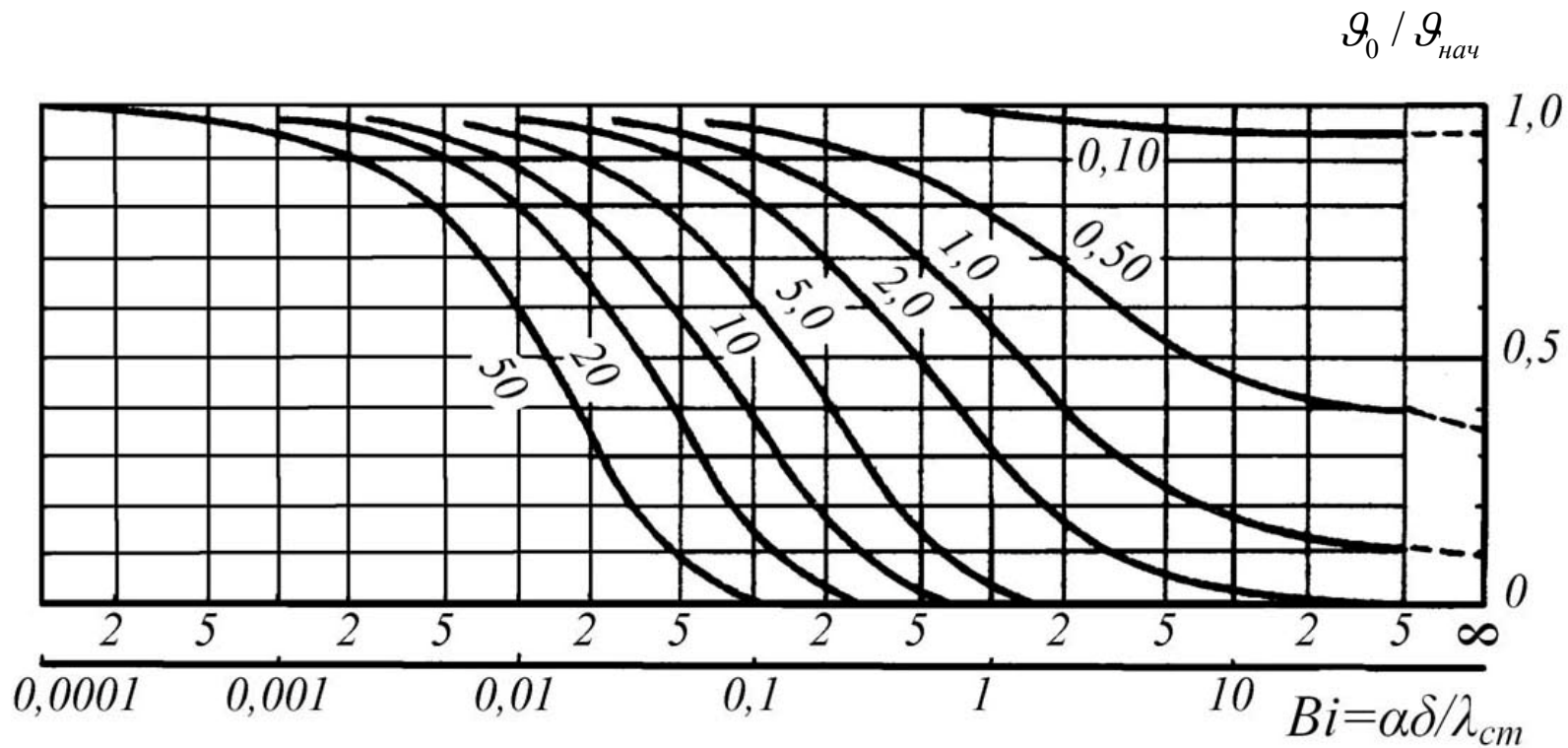


Рис. 7. Зависимости  $\frac{g_0}{g_{нач}} = f(Bi, Fo)$  для плоской стенки

# Теплообмен соприкосновением

## Расчёт полного термического сопротивления контакта

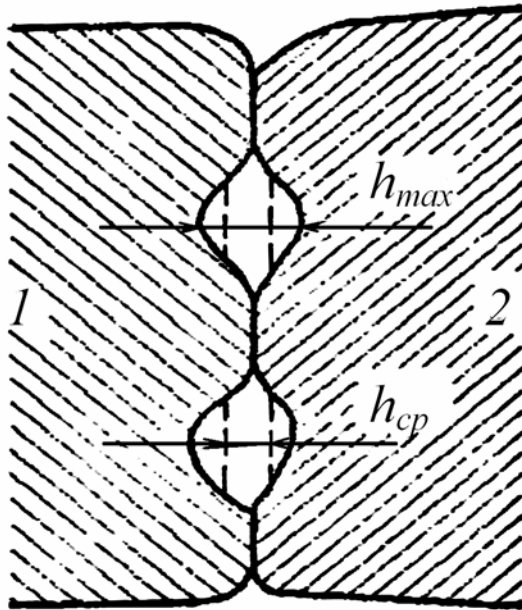


Рис. 8. Изображение контактов двух шероховатых поверхностей

$$R_c = \frac{h_{max}}{\lambda_{cp}} \quad (m^2 \cdot grad) / Bm$$

$$R_m = \frac{3\sigma_v}{2,1p\lambda_m} \cdot 10^{-4} \quad m^2 \cdot K / Bm \quad (13)$$

$\sigma_v$  – предел прочности при контактировании разнородных металлов

$p$  – контактное давление

$\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности;

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_m} \quad (14)$$

Зависимость полного термического сопротивления контакта от нагрузки

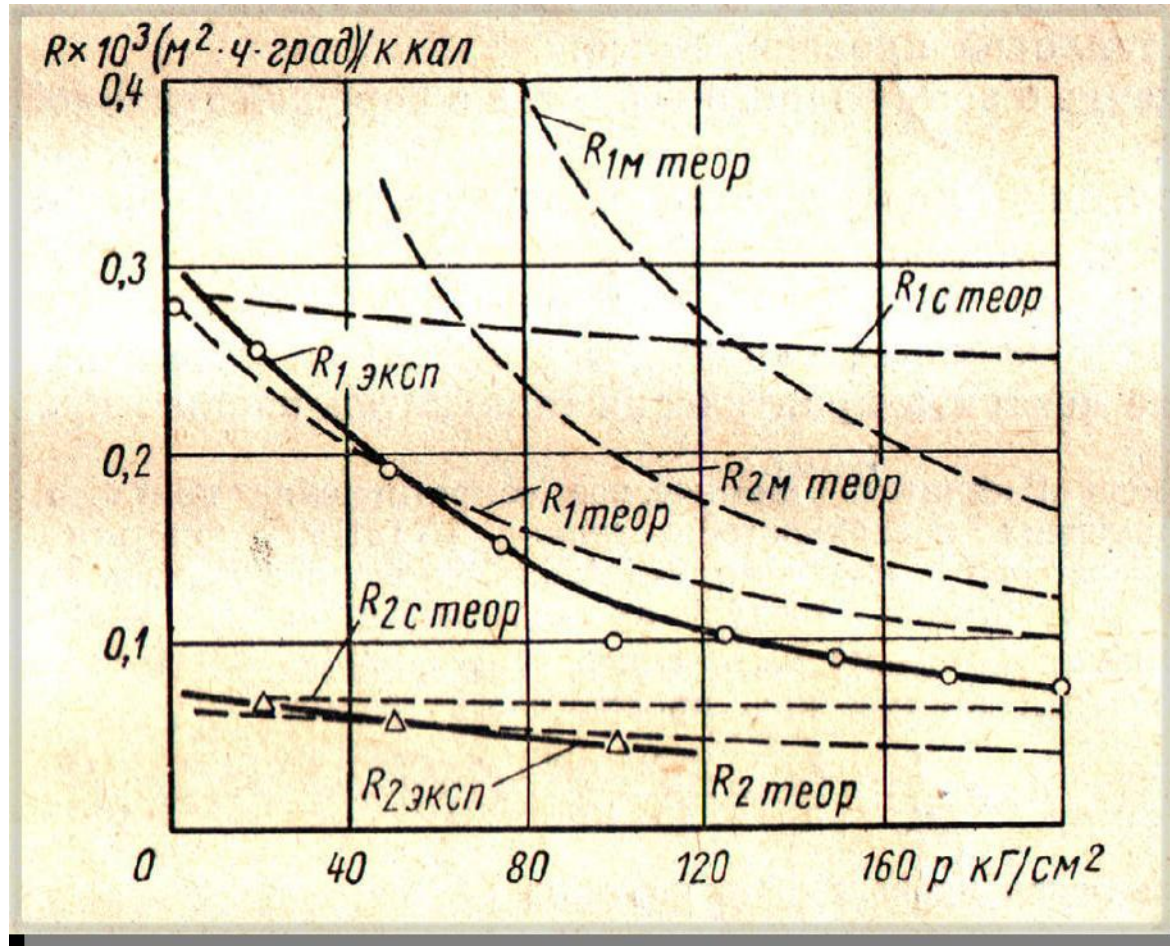


Рис. 9. Сопротивление фактического контакта в зависимости от нагрузки

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория тепломассообмена: Учебник для технических университетов и вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. - 2-е изд., испр. и доп.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.- 683 с.
2. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев и др.; Под ред. В.И. Крутова и Е.В. Шишова.- М.: Высш. школа, 1988.- 216 с.
3. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена: учеб. пособие / В.Н. Афанасьев, С.И. Исаев, И.А. Кожинов и др.; Под ред. В.И. Крутова и Г.Б. Петражицкого. - 2-е изд., стереотипное. - СПб.: БХВ-Петербург, 2011.- 384 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. - Изд. 5-е, перераб. и доп.- М.: Атомиздат, 1979.- 416 с
5. Юдаев Б.Н., Корнейчук Н.К., Самойлов М.С., Федотов Е.И. Основы теплопередачи. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1977. - 77 с.
6. Юдаев Б.Н. Теплопередача. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1973. – 360 с.
7. Головинцов А.Г., Юдаев Б.Н., Федотов Е.И. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.: Машиностроение, 1970. - 470 с. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учебник для вузов.- М.: Высш. шк., 1988. - 478 с.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. , 1977.
9. Рыжков С.В. Учебное пособие «Основы теплообмена». Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 80 с.
10. Михатулин Д.С., Чирков А.Ю. Учебное пособие «Конспект лекций по конвективному тепломассообмену». М.: Янус-К. Часть 1, 2007. Часть 2, 2008.
11. Рыжков С.В., Носатов В.В. Методические указания “Методика и примеры выполнения домашних заданий по тепломассообмену”. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 36 с.
12. Выполнение лабораторных работ по курсу «Теория тепломассообмена»: методические указания / Под ред. В.И. Хвостова, В.Н. Афанасьева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 67 с.
13. Изучение теплофизических процессов и свойств веществ с использованием методов компьютерного моделирования: учеб. пособие по курсу «Теория тепломассообмена» / [В.Н. Афанасьев и др.]; под ред. В.И. Хвостова, В.В. Носатова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. - 82 с.

## Контрольные вопросы

- Основной закон теплопроводности
- Коэффициент температуропроводности
- Значения  $\lambda$  для различных веществ
- Распространение теплоты в стенках
- Многослойная плоская стенка
- Цилиндрические и шаровые стенки
- Основы нестационарной теплопроводности
- Графики для определения температуры пластины
- Теплообмен соприкосновением
- Сопrotивление фактического контакта в зависимости от нагрузки