

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

# ТЕПЛОМАССООБМЕН

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1-36 01 03 «Технологическое оборудование  
машиностроительного производства»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2020

УДК 536.24  
ББК 31.31  
Т34

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»  
«07» сентября 2020 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. С. Н. Хатетовский

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены  
для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование ма-  
шиностроительного производства» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 32 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет», 2020

## Содержание

Практическое занятие № 1. Введение в тепломассообмен .....	4
Практическое занятие № 2. Коэффициент теплопроводности.....	4
Практическое занятие № 3. Передача теплоты в стационарном режиме через плоскую, цилиндрическую и шаровую стенки .....	4
Практическое занятие № 4. Передача теплоты в стационарном режиме через ребристую поверхность .....	5
Практическое занятие № 5. Теплопроводность в стационарном режиме с учетом внутренних источников теплоты .....	7
Практическое занятие № 6. Нестационарная теплопроводность.....	8
Практическое занятие № 7. Конвективный теплообмен при продольном обтекании пластины жидкостью .....	9
Практическое занятие № 8. Конвективный теплообмен при течении жидкости по трубе.....	10
Практическое занятие № 9. Свободная конвекция.....	11
Практическое занятие № 10. Теплообмен излучением в прозрачной среде .....	13
Практическое занятие № 11. Теплообмен излучением в поглощающей среде .....	14
Практическое занятие № 12. Компьютерное моделирование теплопроводности.....	14
Практическое занятие № 13. Компьютерное моделирование конвективного теплообмена.....	17
Практическое занятие № 14. Компьютерное моделирование теплообмена излучением .....	17
Список литературы .....	20

## Практическое занятие № 1. Введение в тепломассообмен

Рассмотреть теоретические вопросы: тепловой поток; вектор плотности теплового потока; закон Фурье; коэффициент теплопроводности; уравнение теплопроводности.

## Практическое занятие № 2. Коэффициент теплопроводности

Рассмотреть методику определения коэффициента теплопроводности для сталей.

## Практическое занятие № 3. Передача теплоты в стационарном режиме через плоскую, цилиндрическую и шаровую стенки

**Задача 1.** Металлическая труба с внутренним диаметром  $d_1 = 160$  мм и наружным диаметром  $d_2 = 170$  мм покрыта двухслойной тепловой изоляцией. Толщина первого слоя изоляции (жароупорной)  $\delta_2 = 20$  мм, второго слоя –  $\delta_3 = 50$  мм. Температура внутренней поверхности трубы  $t_{w1} = 300$  °С, наружной поверхности второго слоя изоляции –  $t_{w4} = 40$  °С. Определить тепловые потери трубопровода на 1 м его длины, если коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda_1 = 50$  (Вт/м)град, первого слоя –  $\lambda_2 = 0,11$  (Вт/м)град, второго слоя –  $\lambda_3 = 0,034$  (Вт/м)град.

### Решение

Тепловой поток, проходящий через стенку трубы длиной в 1 м, может быть вычислен по формуле

$$q = \frac{\pi \cdot (t_{w1} - t_{w4})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3}}, \quad (1)$$

где

$$d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_2 = 170 + 2 \cdot 20 = 210 \text{ мм}; \quad (2)$$

$$d_4 = d_3 + 2 \cdot \delta_3 = 210 + 2 \cdot 50 = 310 \text{ мм}. \quad (3)$$

Откуда

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (300 - 40)}{\frac{2,303}{50} \cdot \lg \frac{170}{160} + \frac{2,303}{0,11} \cdot \lg \frac{210}{170} + \frac{2,303}{0,035} \cdot \lg \frac{310}{210}} = 125 \text{ Вт/м.}$$

Решить следующие задачи.

**Задача 2.** Стена из силикатного кирпича толщиной 250 мм имеет с одной стороны температуру минус 30 °С, а с другой – температуру 20 °С. Найти плотность теплового потока через стену и глубину ее промерзания до температуры 0 °С, считая коэффициент теплопроводности материала стены постоянным.

**Задача 3.** К медному стержню диаметром 20 мм и длиной 200 мм с одного конца через торец подводится теплота. Другой конец охлаждается потоком воды, которая при расходе 0,0167 кг/с нагревается от стержня на 2 °С. Найти перепад температур между концами стержня, приняв, что через боковую поверхность стержня тепловые потери отсутствуют.

**Задача 4.** По чугунному трубопроводу диаметром 60 × 3,5 мм движется пар с температурой 325 °С. Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе  $\alpha_1 = 110 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Окружающий наружный воздух имеет температуру 20 °С. Найти тепловые потери: а) если трубопровод не изолирован и охлаждается воздухом с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_2 = 25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; б) если трубопровод изолирован слоем пеношамота толщиной 70 мм, а  $\alpha_2$  равен 15 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Задача 5.** Варочный котел сферической формы с наружным диаметром 1200 мм сделан из нержавеющей стали. Толщина стенки котла 10 мм. Внутри находится жидкость с температурой 140 °С. Снаружи котел покрыт слоем асбеста толщиной 60 мм. В цехе температура воздуха 29 °С. Коэффициент теплоотдачи внутри и снаружи котла  $\alpha_1 = 600 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и  $\alpha_2 = 18 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  соответственно. После включения вентиляции в цехе температура воздуха снизилась до 23 °С, а коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  от наружной поверхности котла увеличился в 1,6 раза. На сколько процентов возросли потери теплоты от котла?

#### **Практическое занятие № 4. Передача теплоты в стационарном режиме через ребристую поверхность**

**Задача 6.** Определить коэффициент оребрения стенки, при котором величина теплового потока увеличится вследствие оребрения в 10 раз, если оребренной является холодная поверхность стенки и известны следующие величины: коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = 32 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ; толщина стенки без ребер  $\delta = 8 \text{ мм}$ ; коэффициенты теплоотдачи с горячей стороны стенки  $\alpha_1 = 200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ , с холодной –  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ .

*Решение*

Для увеличения теплового потока в 10 раз следует во столько же раз уменьшить полное термическое сопротивление теплопередачи. Полное термическое сопротивление теплопередачи для неоребренной поверхности определяется по формуле

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{200} + \frac{0,008}{32} + \frac{1}{20} = 0,1075 \text{ (град} \cdot \text{м}^2\text{)/Вт.} \quad (4)$$

Полное термическое сопротивление ребренной поверхности

$$\frac{1}{k'} = 0,1 \cdot \frac{1}{k} = 0,01075 \text{ (град} \cdot \text{м}^2\text{)/Вт.} \quad (5)$$

Если оребруется холодная поверхность, то коэффициент оребления  $F_2/F_1$  может быть найден из уравнения

$$\frac{1}{k'} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{\alpha_2}; \quad (6)$$

$$0,01075 = \frac{1}{200} + \frac{0,008}{32} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{10};$$

$$\frac{F_2}{F_1} = 18.$$

Решить следующие задачи.

**Задача 7.** Во сколько раз увеличится отдаваемый тепловой поток, если на поверхности площадью  $800 \times 800$  мм разместить 24 ребра прямоугольного сечения высотой 35 мм, толщиной 5 мм. Материал – латунь, температура окружающей среды  $10^\circ\text{C}$ , температура поверхности у основания ребра  $70^\circ\text{C}$ . Принять коэффициент теплоотдачи от гладкой и ребристой поверхностей  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Задача 8.** Воздух в холодильной камере отдает теплоту охлаждающему устройству из горизонтальных труб с наружным диаметром 14 мм. Температура воздуха в камере минус  $5^\circ\text{C}$ , температура наружной поверхности трубы минус  $10^\circ\text{C}$ . Во сколько раз возрастет тепловой поток от воздуха к трубам, если трубы оребрить поперечными круглыми латунными ребрами с постоянной толщиной 1 мм. Диаметр ребер 38 мм, шаг 12,5 мм. Средний коэффициент теплоотдачи к ребристой поверхности трубы принять  $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

## Практическое занятие № 5. Теплопроводность в стационарном режиме с учетом внутренних источников теплоты

**Задача 9.** Электрический нагреватель выполнен из нихромовой проволоки диаметром  $d = 2$  мм и длиной  $l = 10$  м. Вычислить тепловой поток с 1 м нагревателя, если удельное электрическое сопротивление нихрома  $\rho = 1,1$  (Ом · мм<sup>2</sup>)/м.

*Решение*

Электрическое сопротивление нагревателя

$$R = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot r^2} = \frac{1,1 \cdot 10}{3,14 \cdot 1} = 3,5 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Количество теплоты

$$Q = I^2 \cdot R = 25^2 \cdot 3,5 = 2185 \text{ Вт.} \quad (8)$$

Удельный тепловой поток

$$q = \frac{Q}{l} = \frac{2185}{10} = 218,5 \text{ Вт/м.} \quad (9)$$

Решить следующие задачи.

**Задача 10.** Медная шина прямоугольного сечения 30 x 3 мм находится под током 300 А. По условиям эксплуатации максимально допустимая температура шины не должна превышать 75 °С при температуре окружающего воздуха 20 °С. Определить мощность внутренних источников теплоты, температуру на поверхности шины и коэффициент теплоотдачи от поверхности шины к воздуху при обеспечении заданных условий эксплуатации. Принять удельное электрическое сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

**Задача 11.** По титановому стержню диаметром 25 мм и длиной 600 мм проходит электроток силой 15 А и напряжением 36 В. Измерение температуры поверхности стержня показало 216 °С. Найти температуры в стержне на радиусах 5 и 10 мм.

## Практическое занятие № 6. Нестационарная теплопроводность

**Задача 12.** Резиновая пластина толщиной  $2\delta = 20$  мм, нагретая до температуры  $t_0 = 140$  °С, помещена в воздушную среду с температурой  $t_{\text{ж}} = 15$  °С. Определить температуры в середине и на поверхности пластины через  $\tau = 20$  мин после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины  $\lambda = 0,175$  Вт/(м·град). Коэффициент температуропроводности резины  $a = 0,833 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху  $\alpha = 65$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

*Решение*

В рассматриваемом случае

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} = \frac{65 \cdot 0,01}{0,175} = 3,73; \quad (10)$$

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{\delta^2} = \frac{0,833 \cdot 10^{-7} \cdot 1200}{0,01^2} = 1,0. \quad (11)$$

По этим данным по справочнику находим температуры:  $\Theta_{x=0} = 0,26$ ;  $\Theta_{x=\delta} = 0,083$ .

Безразмерная температура

$$\Theta = \frac{t - t_{\text{ж}}}{t_0 - t_{\text{ж}}}. \quad (12)$$

Откуда

$$t_{x=0} = t_{\text{ж}} + \Theta_{x=0} \cdot (t_0 - t_{\text{ж}}) = 15 + 0,26 \cdot (140 - 15) = 47,5 \text{ °С}; \quad (13)$$

$$t_{x=\delta} = t_{\text{ж}} + \Theta_{x=\delta} \cdot (t_0 - t_{\text{ж}}) = 15 + 0,083 \cdot (140 - 15) = 25,4 \text{ °С}. \quad (14)$$

Решить следующие задачи.

**Задача 13.** Стальной лист толщиной 30 мм (теплоемкость 0,42 кДж/(кг·К), плотность 7900 кг/м<sup>3</sup>) нагрет до 400 °С и охлаждается в воздухе с температурой 10 °С при коэффициенте теплоотдачи 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Через сколько часов температура листа на поверхности будет на 11 °С отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с 1 м<sup>2</sup> листа за время охлаждения?

**Задача 14.** Вал диаметром 140 мм с температурой 27 °С поместили в нагреватель, где температура постоянна и равна 860 °С. Процесс нагрева длился до получения на поверхности вала температуры 520 °С. Найти время нагрева и темпера-



туру на оси вала, если теплопроводность материала вала  $38 \text{ Вт/(м·К)}$ , температуропроводность  $6,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а коэффициент теплоотдачи  $163 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

## Практическое занятие № 7. Конвективный теплообмен при продольном обтекании пластины жидкостью

**Задача 15.** Тонкая пластина длиной  $l_0 = 2 \text{ м}$  и шириной  $a = 1,5 \text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока  $w_0 = 3 \text{ м/с}$  и  $t_0 = 20 \text{ °С}$  соответственно. Температура поверхности пластины  $t_c = 90 \text{ °С}$ . Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи и количество теплоты, отдаваемой пластиной воздуху.

*Решение*

Для воздуха при  $t_0 = 20 \text{ °С}$  имеем следующее:  $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ ;  $\text{Pr} = 0,703$ .

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w_0 \cdot l_0}{\nu} = \frac{3 \cdot 2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 3,98 \cdot 10^5. \quad (15)$$

Следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле

$$\text{Nu} = 0,67 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad (16)$$

где

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda}; \quad (17)$$

$$\text{Re} = \frac{w_0 \cdot l_0}{\nu}. \quad (18)$$

В рассматриваемом случае

$$\text{Nu} = 0,67 \cdot (3,98 \cdot 10^5)^{\frac{1}{2}} \cdot (0,703)^{\frac{1}{3}} = 375.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{l_0} = 375 \cdot \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{2} = 4,87 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \quad (19)$$

Количество передаваемой теплоты с обеих сторон пластины

$$Q = \alpha \cdot (t_c - t_0) \cdot F = 4,87 \cdot (90 - 20) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,5 = 2050 \text{ Вт.} \quad (20)$$

Решить следующие задачи.

**Задача 16.** Вдоль горячей стенки с постоянной температурой  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  направлен поток воздуха со скоростью  $5 \text{ м/с}$ . Определить средний коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, если длина стенки  $2 \text{ м}$ , а температура набегающего воздуха  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить местный коэффициент теплоотдачи и толщину гидродинамического пограничного слоя воздуха на расстоянии  $1 \text{ м}$  от начала стенки.

**Задача 17.** Вдоль плоской стенки с обеих сторон движутся турбулентные потоки двух жидкостей. В процессе теплообмена с одной стороны коэффициент теплоотдачи  $230 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ , с другой –  $400 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Во сколько раз увеличится коэффициент теплопередачи через стенку, разделяющую жидкости, если скорость первого потока возрастет в  $2$  раза, а второго – в  $3$  раза? Термическое сопротивление стенки не учитывать.

## Практическое занятие № 8. Конвективный теплообмен при течении жидкости по трубе

**Задача 18.** Для лабораторной установки требуется подавать воду по горизонтальной стеклянной трубке при  $t_f = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью  $w = 0,2 \text{ м/с}$ . Внутренний диаметр трубки  $d = 3 \text{ мм}$ . Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи, если изменение температуры  $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Решение*

При определяющей температуре  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  значения физических параметров воды следующие:  $\lambda = 67,5 \cdot 10^{-2} \text{ (Вт/м)град}$ ;  $\nu = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2\text{/с}$ ;  $\beta = 6,32 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$ ;  $\text{Pr} = 2,21$ .

Для выбора критериального уравнения определяем  $\text{Re}$ :

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1640. \quad (21)$$

Вычисляем критерий  $\text{Gr}$ :

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t = \frac{9,81 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4} \cdot (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 5}{(0,365 \cdot 10^{-6})^2} = 0,63 \cdot 10^4. \quad (22)$$

Определяем критерий Nu:

$$\text{Nu} = 0,17 \cdot \text{Re}^{0,33} \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot \text{Gr}^{0,1} = 0,17 \cdot 1640^{0,33} \cdot 2,21^{0,43} \cdot (0,63 \cdot 10^4)^{0,1} = 6,7. \quad (23)$$

Находим значение  $\alpha$ :

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{d} = 6,7 \cdot \frac{0,675}{0,003} = 1510 \text{ (Вт/м}^2\text{)град.} \quad (24)$$

Решить следующие задачи.

**Задача 19.** По горизонтальной трубе диаметром 20 x 1 мм протекает вода с температурой 85 °С на входе. Средняя температура стенки 15 °С. Расход воды 0,5 кг/с. На выходе из трубы вода должна иметь температуру 25 °С. Какой длины трубу следует для этого взять?

**Задача 20.** В трубу водоподогревателя с температурой стенки 250 °С вода входит с  $t_1 = 160$  °С и выходит с  $t_2 = 240$  °С. Режим течения воды турбулентный, скорость 1 м/с. Тепловая нагрузка поверхности нагрева трубы  $3,7 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Найти внутренний диаметр и длину трубы.

## Практическое занятие № 9. Свободная конвекция

**Задача 21.** Определить тепловые потери вертикальной трубы с внешним диаметром  $d = 100$  мм и длиной  $h = 8$  м, если температура наружной поверхности трубы  $t_w = 180$  °С, а температура окружающего воздуха  $t_f = 20$  °С.

*Решение*

Данная задача относится к случаю свободного движения в неограниченном пространстве. Для расчета может быть использовано соответствующее критериальное уравнение. Определяющая температура

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = \frac{180 + 20}{2} = 100 \text{ °С.} \quad (25)$$

Определяем соответствующие этой температуре параметры воздуха при  $t_m = 100$  °С:  $\lambda = 3,21 \cdot 10^{-2}$  (Вт/м)град;  $\nu = 23,13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\text{Pr} = 0,688$ .

Вычисляем критерий Gr:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \Delta t, \quad (26)$$

где  $\beta = 1/373$ ;  
 $\Delta t = 160 \text{ }^\circ\text{C}$  – разность температур.  
 Откуда

$$\text{Gr} = \frac{9,81 \cdot 0,1^3 \cdot 160}{373 \cdot (23,13 \cdot 10^{-6})^2} = 7,9 \cdot 10^{-6}.$$

Определяем произведение следующим образом:

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,688 = 5,43 \cdot 10^{-6}.$$

По справочнику  $C = 0,54$ ;  $n = 1/4$ .  
 Находим критерий Nu:

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n = 0,54 \cdot (5,43 \cdot 10^{-6})^{0,25} = 26. \quad (27)$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d} = \frac{26 \cdot 3,21 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 8,4 \text{ (Вт/м}^2\text{)град.} \quad (28)$$

Тепловые потери

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_w - t_f) = 8,4 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 8 \cdot 160 = 3340 \text{ Вт.} \quad (29)$$

Решить следующие задачи.

**Задача 22.** Горизонтальная плита с обращенной вверх теплоотдающей поверхностью имеет размеры  $600 \times 1100$  мм и нагрета до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вдали от плиты воздух имеет температуру  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти тепловой поток от плиты к окружающему воздуху.

**Задача 23.** В большом баке с водой охлаждается вертикальная пластина шириной 3 м и высотой 2 м, ее температура  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя температура воды  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти передаваемую воде теплоту.

## Практическое занятие № 10. Теплообмен излучением в прозрачной среде

**Задача 24.** Определить величину собственного излучения полированной алюминиевой поверхности при температуре  $t_w = 530$  °С.

*Решение*

Величина собственного излучения определяется по уравнению

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left( \frac{T_w}{100} \right)^4, \quad (30)$$

где  $\varepsilon = 0,054$ .

Откуда

$$E = 0,054 \cdot 5,7 \cdot \left( \frac{530 + 273}{100} \right)^4 = 1280 \text{ Вт/м}^2.$$

Решить следующие задачи.

**Задача 25.** Определить тепловой поток, излучаемый стальной трубой; окисленной поверхностью, имеющей наружный диаметр 70 мм и длину 10 м. Температура поверхности трубы 230 °С. Труба расположена в помещении на большом удалении от стен, температура которых 20 °С.

**Задача 26.** Экран из окисленного никеля расположен между двумя стальными листами с шероховатой поверхностью. Температура листов 420 и 120 °С соответственно. Найти температуру экрана и плотность теплового потока излучением. Какой станет плотность теплового потока излучением, если экран будет сделан из хрома?

**Задача 27.** Температура диска из хрома 500 °С, а из полированной стали 200 °С. Диски имеют одинаковый диаметр, равный 200 мм, и расположены параллельно с центрами на общей нормали на расстоянии 50 мм друг от друга. Найти: а) средний угловой коэффициент лучеиспускания; б) лучистый тепловой поток между дисками. Определить те же величины, если расстояние между дисками будет 200 мм.

## Практическое занятие № 11. Теплообмен излучением в поглощающей среде

**Задача 28.** Продукты сгорания, состоящие по объему из 10 % CO<sub>2</sub>, 10 % O<sub>2</sub>, 9 % H<sub>2</sub>O и 71 % N<sub>2</sub>, протекают по трубе диаметром  $d = 300$  мм. Определить коэффициент черноты этой смеси, если средняя температура продуктов сгорания  $t = 800$  °С, а давление  $P = 9,8$  Н/см<sup>2</sup>.

*Решение*

Азот и кислород практически прозрачны для тепловых лучей.

Парциальное давление газа равно произведению общего давления смеси на объемную долю данного газа, т. е.  $P(\text{CO}_2) = 0,1$  атм;  $P(\text{H}_2\text{O}) = 0,09$  атм.

Средняя длина пути луча

$$l = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 0,27 \text{ м.} \quad (31)$$

По этим данным по справочнику определяем следующее:  $\varepsilon(\text{CO}_2) = 0,076$ ;  $\varepsilon(\text{H}_2\text{O}) = 0,2$ ;  $\beta = 1,08$ ;  $\Delta\varepsilon = 0$ .

Откуда

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon = 0,076 + 1,08 \cdot 0,2 = 0,292. \quad (32)$$

**Задача 29.** Определить коэффициент черноты смеси продуктов сгорания, имеющей следующий состав по объему: CO<sub>2</sub> – 10 %; O<sub>2</sub> – 10 %; H<sub>2</sub>O – 10 %; N<sub>2</sub> – 70 %. Смесь протекает по трубе диаметром  $d = 210$  мм при температуре  $t_f = 700$  °С, давлении  $P = 11,7$  Н/см<sup>2</sup>, температура поверхности трубы  $t_w = 500$  °С.

## Практическое занятие № 12. Компьютерное моделирование теплопроводности

**Задача 30.** Смоделировать передачу теплоты в цилиндре (рисунок 1).

*Решение*

При помощи инструментов системы автоматизированного проектирования NX создаем твердотельную модель цилиндра. Моделирование выполняем в приложении «Modeling».

Активируем приложение «Advanced Simulation» («Pre/Post»), в котором создаем файл идеализированной модели, файл FEM и файл симуляции (файл SIM). Выбираем решатель NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow).

Выбираем тип анализа Thermal.

Активируем файл FEM. Разбиваем твердотельную модель на конечные элементы типа HEXA8 (рисунок 2). Задаем материал: Steel (сталь).

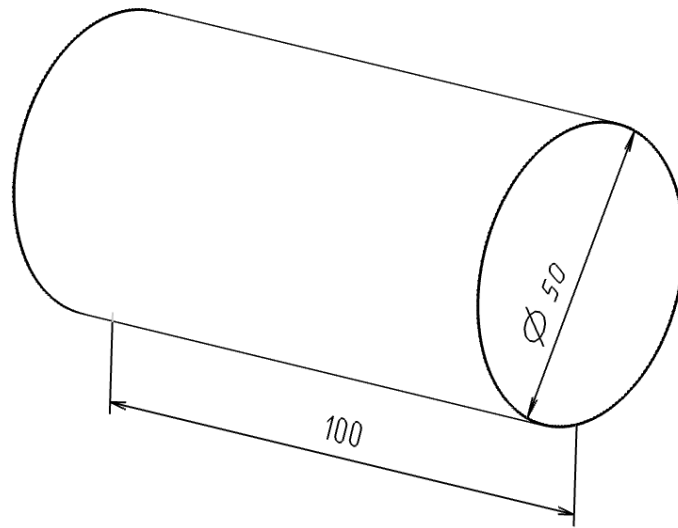


Рисунок 1 – Твердотельная модель цилиндра

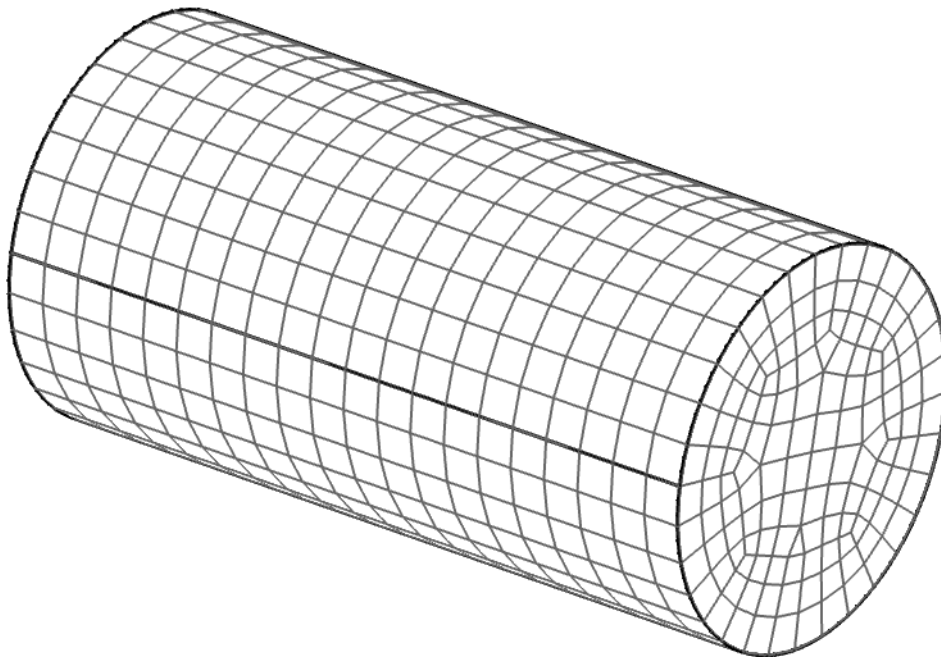


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель цилиндра

Активируем файл SIM. Создаем решение. В опциях решения задаем тип решения («Solution Type») «Transient»; временной интервал от 0 («Start Time») до 300 с («End Time»); количество шагов («Number of Time Steps») принимаем равным 100.

Создаем ограничение «Temperature». Устанавливаем температуру, равную 300 °C (рисунок 3).

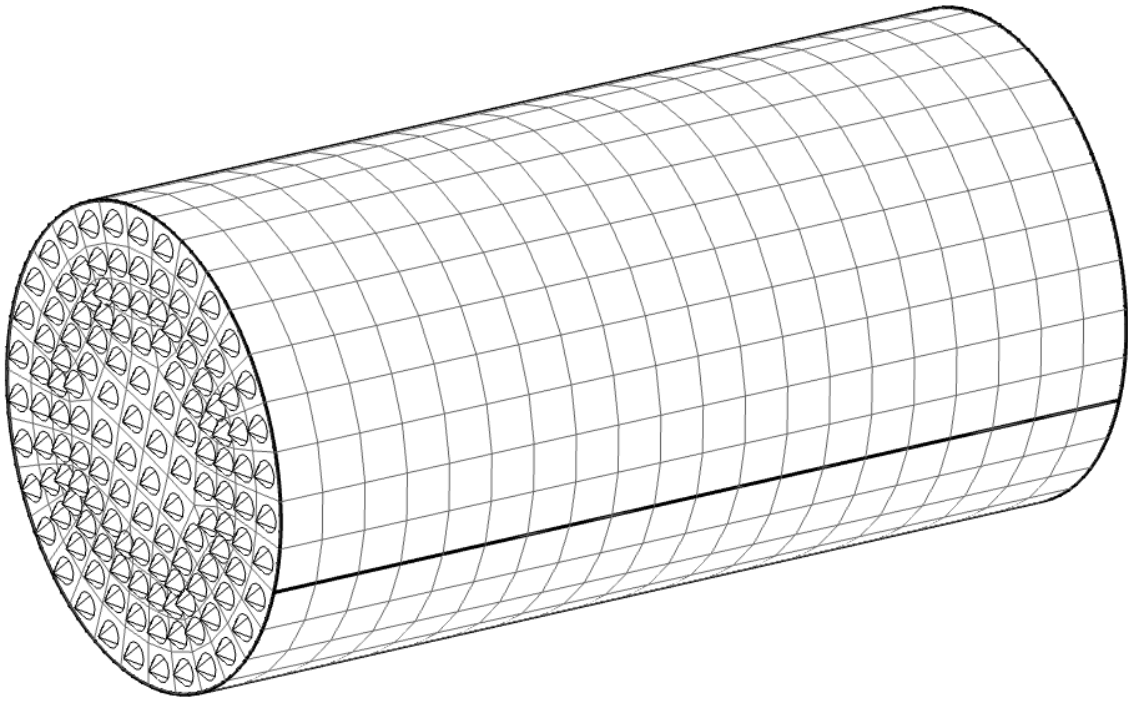
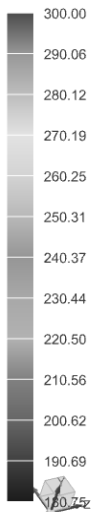


Рисунок 3 – Ограничения «Temperature»

Решаем задачу.

В постпроцессоре визуализируем поле температуры (рисунок 4).

cyL\_sim1 : Solution 1 Result  
Load Case 1, Increment 11, 300 sec  
Temperature - Nodal, Scalar  
Min : 180.75, Max : 300.00, Units = C



Units = C

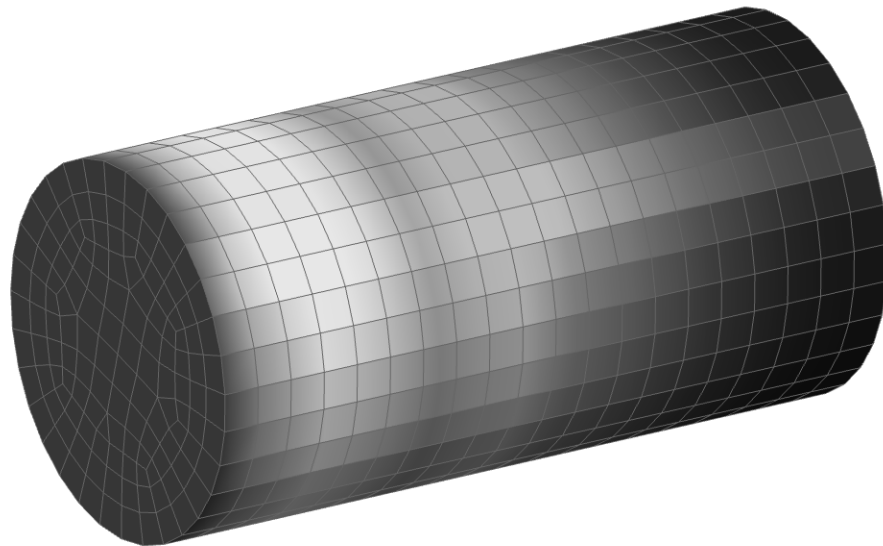


Рисунок 4 – Результаты решения задачи 30



## Практическое занятие № 13. Компьютерное моделирование конвективного теплообмена

**Задача 31.** Смоделировать передачу теплоты в прямоугольном бруске сечением  $40 \times 60$  мм длиной 100 мм. Один торец бруска имеет постоянную температуру  $400$  °С. С поверхности бруска отводится теплота при помощи конвекции (коэффициент выбрать самостоятельно). Время процесса 400 с.

Указание к решению задачи: использовать ограничение «Convection to Environment».

## Практическое занятие № 14. Компьютерное моделирование теплообмена излучением

**Задача 32.** Смоделировать теплообмен излучением между двумя перпендикулярными пластинами (рисунок 5).

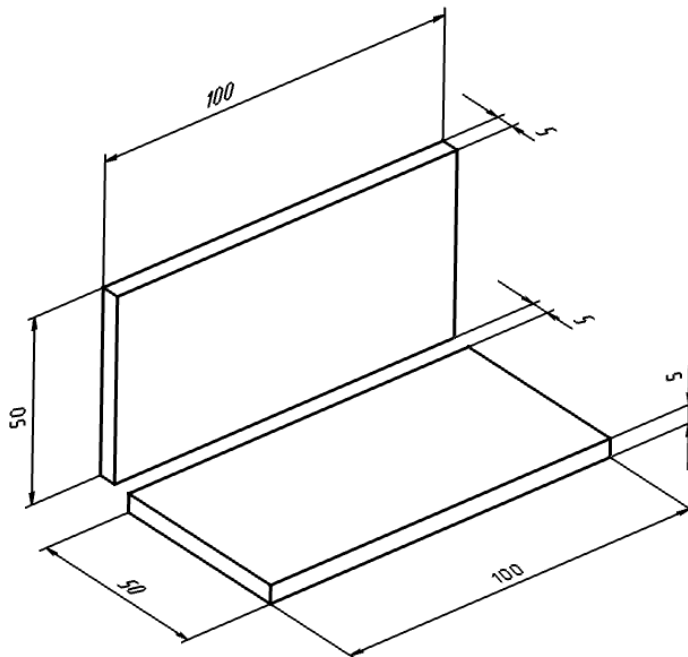


Рисунок 5 – Твёрдотельная модель пластин

### Решение

При помощи инструментов системы автоматизированного проектирования NX создаем твердотельную модель пластин. Моделирование выполняем в приложении «Modeling».

Активируем приложение «Advanced Simulation» («Pre/Post»), в котором создаем файл идеализированной модели, файл FEM и файл симуляции (файл SIM). Выбираем решатель NX Thermal/Flow (Simcenter Thermal/Flow).

Выбираем тип анализа Thermal.

Активируем файл FEM. Разбиваем твердотельную модель на конечные элементы типа QUAD4 Thin Shell (рисунок 6). Задаем материал: Steel (сталь). Задаем толщину элементов 0,1 мм. Для верхней пластины задаем параметр «Emissivity» равным 0,6, а для нижней пластины – 1.

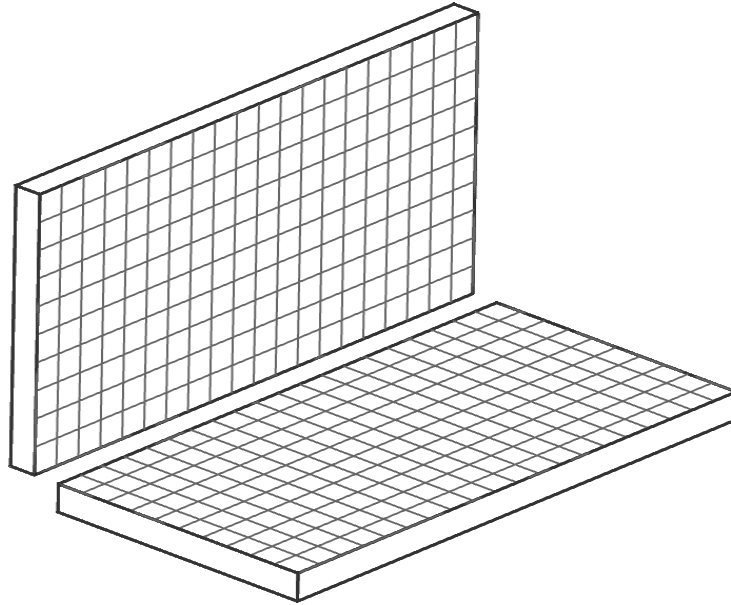


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель пластин

Активируем файл SIM. Создаем решение.

Создаем объект симуляции «Radiation» (рисунок 7).

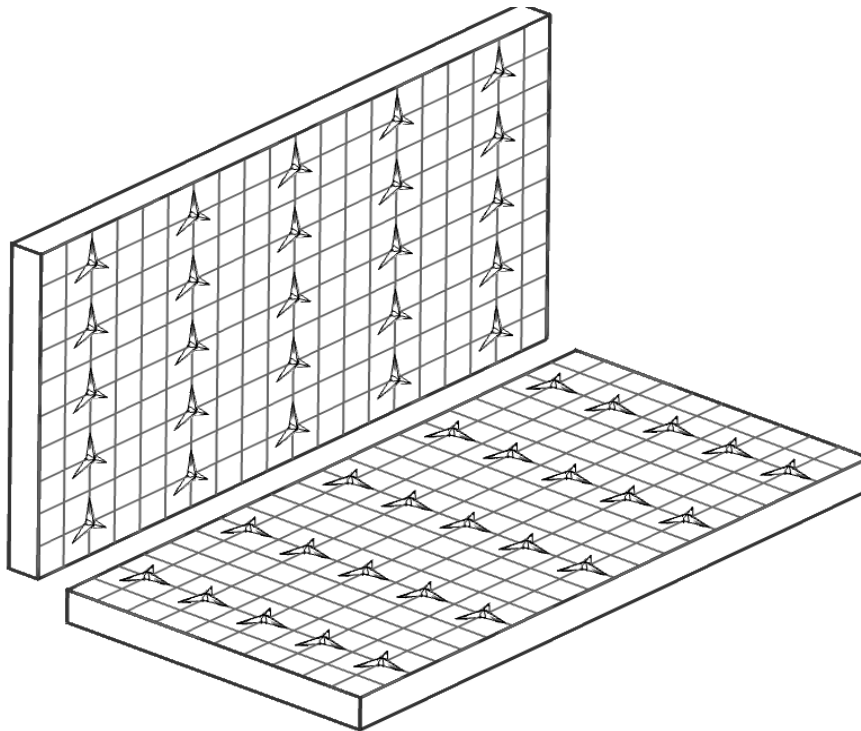


Рисунок 7 – Объект симуляции «Radiation»

Создаем ограничение «Temperature». Выставляем температуру 400 °С (рисунок 8).

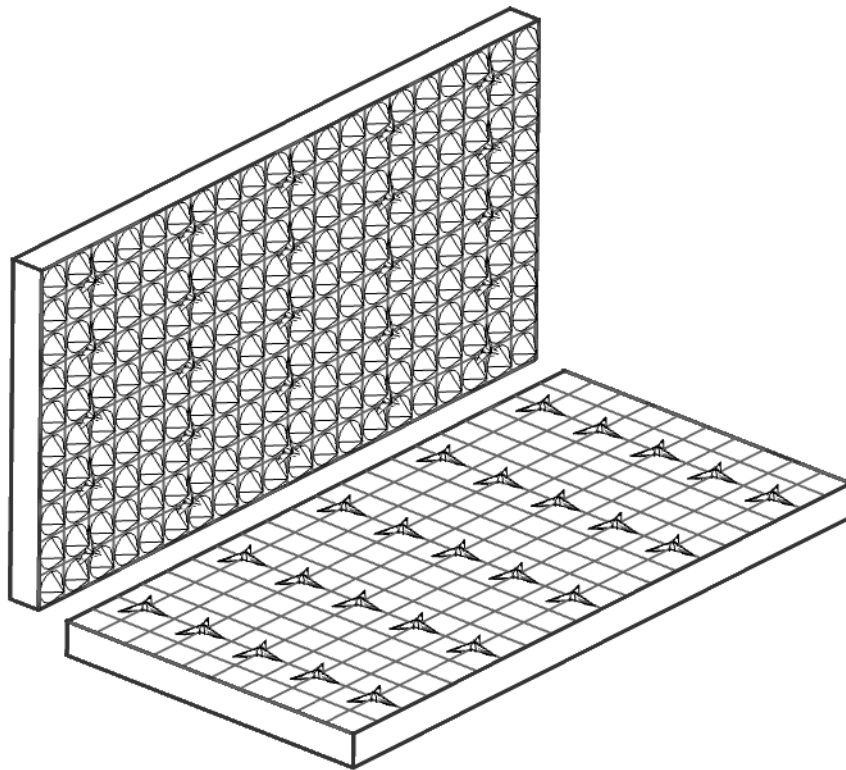


Рисунок 8 – Ограничение «Temperature»

Решаем задачу.

В постпроцессоре визуализируем поле температуры (рисунок 9).

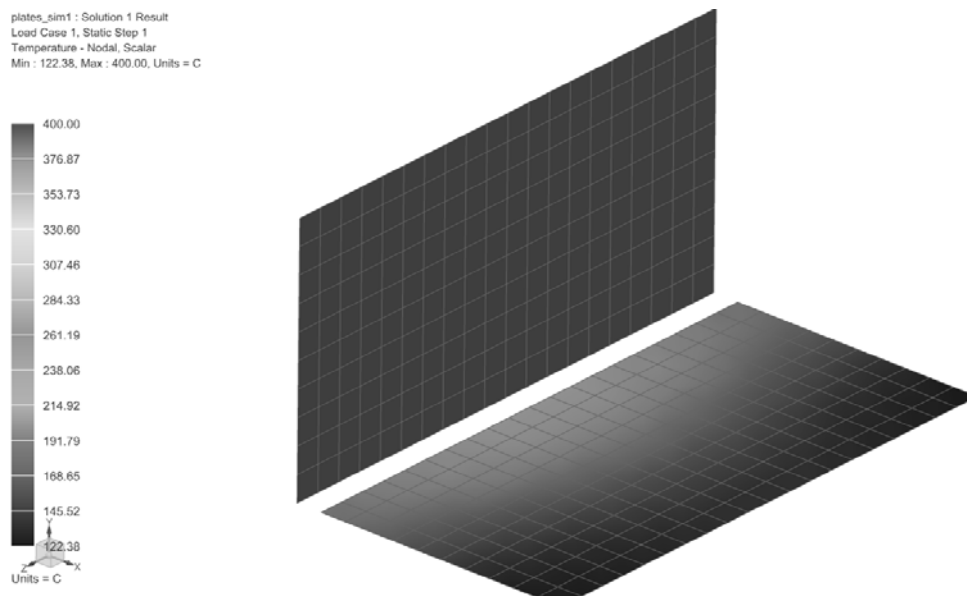


Рисунок 9 – Результаты решения задачи 32

## Список литературы

- 1 **Кудинов, А. А.** Тепломассообмен: учебное пособие / А. А. Кудинов. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 375 с.
- 2 **Резников, А. Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.
- 3 **Резников, А. И.** Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. И. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.
- 4 **Краснощеков, Е. А.** Задачник по теплопередаче: учебное пособие для вузов / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1980. – 288 с.
- 5 **Авчухов, В. В.** Задачник по процессам тепломассообмена : учебное пособие для вузов / В. В. Авчухов, Б. Я. Паюсте. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
- 6 **Михайлова, М. М.** Сборник задач и примеров расчета по теплопередаче / М. М. Михайлова. – Москва : ВИНТИ, 1963. – 127 с.