

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Л.С. Печенкина А.А. Щетинин

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
ДЛЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕПЛОФИЗИКА»

Утверждено учебно-методическим советом университета
в качестве учебно-методического пособия

Воронеж 2018

УДК 536.24 (075.8)
ББК 22.311.33.1я7
ПЗ17

Рецензенты:

*ООО «Литейщик» (г. Воронеж)
(директор А.В. Кобзарев);
канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Лукин*

Печенкина, Л.С.

ПЗ17 Практические расчеты для дисциплины «Теплофизика»: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (0,6 Мб) / Л.С. Печенкина, А.А. Щетинин. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0629-6

Пособие содержит рекомендации по основным понятиям и закономерностям, которые студенты должны усвоить перед решением задач. В них содержатся также задачи по всем разделам учебной программы, расположенные в порядке возрастающей трудности. Большая часть задач сопровождается конечными ответами, что важно для организации эффективной самостоятельной работы.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 22.03.02 «Металлургия» (профиль «Технология литейных процессов»), дисциплине «Теплофизика».

Ил. 19. Библиогр.: 6 назв.

**УДК 536.24 (075.8)
ББК 22.311.33.1я7**

ISBN 978-5-7731-0629-6

© Печенкина Л.С.,
Щетинин А.А, 2018
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием науки и техники все большее значение во многих отраслях промышленности приобретают процессы тепло- и массообмена. Решение многих задач металлургии и материаловедения – повышение эффективности всех металлургических переделов, получение материалов с заданными свойствами, формирование структуры и свойств отливок ответственного назначения - непосредственно связано с успехами в изучении и развитии теории тепломассообмена.

Учебный курс теплофизики является базой для изучения профильных дисциплин подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», таких, как «Металлургическая теплотехника», «Теория литейных процессов», «Технология литейных процессов», «Физические основы затвердевания металлов и сплавов» и др., для решения основных задач, возникающих при выполнении и защите курсовых проектов по специальным дисциплинам учебного плана и выпускной квалификационной работы.

Студенты должны изучить представления о физических механизмах тепломассопереноса, овладеть не только теорией, но и методами расчета основных процессов переноса тепла и массы. Для инженерных расчетов традиционных задач имеется значительное количество расчетных формул, методика применения которых будет изучена в предлагаемом курсе. В то же время новая техника, поступающая сейчас на предприятия металлургии и машиностроения, непрестанно выдвигает перед практиками новые и разнообразные задачи, требуя от специалиста умения самостоятельно и творчески использовать основные законы и методы тепломассопереноса. Особое значение

эти законы приобретают при организации управления, когда повышаются требования к качеству получаемых продуктов, безопасности и надежности металлургических печей и литейных комплексов и агрегатов, их экологической чистоты. Следует выделить еще одну черту, характерную для металлургических технологий - в них процессы тепло- и массопереноса взаимосвязаны, причем в некоторых случаях весьма трудно определить ведущую роль той или иной группы процессов.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА

Основные понятия и закономерности:

♦ тепловой поток, плотность теплового потока, молекулярная теплопроводность, коэффициент теплопроводности, градиент температуры, закон Фурье;

♦ конвекция, теплоотдача, закон Ньютона-Рихмана, коэффициент теплоотдачи;

♦ молекулярная диффузия, концентрация, диффузионный поток (поток массы), плотность диффузионного потока, закон Фика, градиент концентрации, коэффициент диффузии, конвективная диффузия, закон Стефана;

♦ внутреннее трение (вязкость), уравнение Ньютона, градиент скорости, коэффициент вязкости.

Задачи

1. Пространство между двумя коаксиальными цилиндрами заполнено воздухом, находящимся при комнатной температуре. Внешний цилиндр приводится во вращение силой $F=6,28 \cdot 10^{-4}$ Н. С какой скоростью будет вращаться внутренний цилиндр, если в установившемся режиме скорость вращения внешнего цилиндра $n=16,6$ с⁻¹? Размеры внешнего цилиндра: высота $h_1=10$ см, радиус $R_{01}=10$ см. Соответствующие размеры внутреннего цилиндра равны $h_2=10$ см и $R_{02}=8$ см. Динамическую вязкость воздуха принять равной $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

Ответ: $15,9$ с⁻¹.

2. Один из методов определения теплопроводности твёрдых тел заключается в следующем. Два цилиндрических стержня, один из исследуемого материала, а другой из эталонного, соосно размещаются между двумя резервуарами, обеспечивающими поддержание постоянной температуры на концах стержней. Обычно используются медные резервуары, в одном циркулирует кипящая вода, в другом смесь воды со

льдом (рис. 1). По достижении стационарного состояния измеряют температуру на стыке цилиндров t_0 .

Определить теплопроводность образца λ_x , если $t_0=30^\circ\text{C}$, теплопроводность эталона $\lambda_s = 100 \text{ Вт/(м·K)}$.

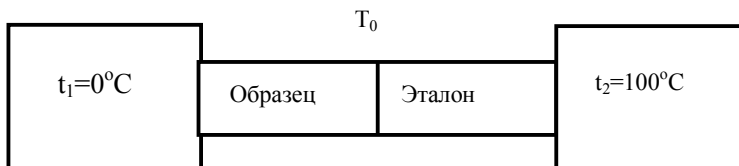


Рис. 1

Боковые поверхности цилиндров хорошо теплоизолированы.

Ответ: 233,3 Вт/(м·K).

3. Температура нагревательного элемента электрической печи (радиус $R_0=1\text{см}$, удельное сопротивление материала $\rho=2\cdot 10^{-4} \text{ Ом·см}$) измеряется термопарой, находящейся в кварцевом колпачке, толщина кварца $\delta=1\text{мм}$, его удельная теплопроводность $\lambda=0,02 \text{ Вт/(м·K)}$.

Определить истинную температуру поверхности t_n нагревательного элемента, если термопара показывает температуру $t_r=1200^\circ\text{C}$ при токе через элемент $I=100 \text{ А}$.

Ответ: 1225°C .

4. Слиток осмия весом 100 г (начальная температур $t_0=20^\circ\text{C}$) нагревается в герметичном цилиндрическом контейнере из двуокиси циркония размерами внутренней полости: радиус $R_0=3 \text{ см}$, высота $h=10 \text{ см}$, толщина стенок $\delta=5 \text{ мм}$.

Определить время τ , за которое расплавится металл, если перепад температур на стенках контейнера поддерживается

постоянным и равным $\Delta t = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Теплофизические характеристики осмия: $t_{\text{пл}} = 2700 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{\text{пл}} = 140 \text{ Дж/г}$, средняя теплоемкость $c_p = 0,13 \text{ Дж/(г}\cdot\text{K)}$. Теплопроводность двуокиси циркония $\lambda = 1,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

Ответ: 85 с.

5. Температура плавиковой кислоты, проходящей по трубопроводу, измеряется термометром, помещенным во фторопластовую цилиндрическую гильзу, заполненную маслом (рис. 2). Термометр показывает температуру $t_r = 29,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

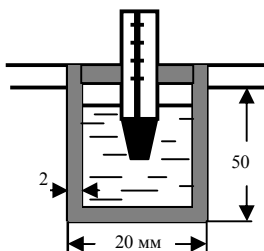


Рис. 2

Определить истинную температуру t плавиковой кислоты, если масло в гильзе нагревается за счет передачи тепла через гильзу на 5 за 12 мин. Теплоемкость масла $c_p = 1,26 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, объем масла в гильзе $V = 10 \text{ мл}$, плотность масла $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Теплопроводность фторопласта $\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Перепадом температуры в слое масла пренебречь.

Ответ: $33,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

6. Антикатоде рентгеновской трубки представляет собой цилиндрический стержень длиной $l = 300 \text{ мм}$ и радиусом $R_0 = 10 \text{ мм}$. Определить разницу в температурах горячего и холодного концов антикатада, если через боковую поверхность стержня тепло не передается, а холодный конец омывается

проточной водой, которая нагревается на 1,5 при расходе 1 л/мин. Теплопроводность стержня $\lambda=100$ Вт/(м·К). $c_{pH_2O}=4,2$ Дж/(г·К).

Ответ: 1003,2 °С.

7. Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной $\delta=50$ мм равна $q=70$ Вт/м². Определить разность температур на поверхностях стенки и численные значения градиента температуры в стенке, если она выполнена: а) из латуни ($\lambda=70$ Вт/(м·К)); б) из красного кирпича ($\lambda=0,7$ Вт/(м·К)); в) из пробки ($\lambda=0,07$ Вт/(м·К)).

Ответ: 0,05 К; 5К; 50 К; 1 К/м; 100 К/м; 1000 К/м.

8. Определить потерю тепла (Вт) через стенку из красного кирпича длиной $l=5$ м, высотой $h=4$ м и толщиной $\delta=250$ мм, если температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными $t_1=110$ °С, $t_2=40$ °С. Коэффициент теплопроводности $\lambda=0,7$ Вт/(м·К).

Ответ: 3,92 кВт.

9. Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при её толщине $\delta=40$ мм и разности температур на поверхностях $\Delta t=20$ °С плотность теплового потока $q=145$ Вт/м².

Ответ: 0,29 Вт/м К.

10. Определить теплоотдачу и поток тепла от кирпичной стенки площадью $S=2\cdot0,8$ м², нагретой до 120 °С в помещении, температура воздуха в котором 20 °С. Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha=6,82$ Вт/(м²·К).

Ответ: 682 Вт/м²; 1,1 кВт.

11. Определить поток тепла от горизонтальной плиты шириной 1 м и длиной 3 м, если: а) теплоотдающая поверхность обращена вниз ($\alpha = 4,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); б) та же плита обращена теплоотдающей поверхностью вверх ($\alpha = 9,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Температура воздуха 15°C , температура горячей поверхности 125°C .

Ответ: 1,6 кВт; 3 кВт.

12. Витковый электронагреватель из нихромовой проволоки диаметром $d=0,5 \text{ мм}$ имеет температуру $t_n=500^\circ \text{C}$. Определить силу тока, проходящего через электронагреватель, если коэффициент теплоотдачи $\alpha=63,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура окружающего воздуха $t_c=20^\circ \text{C}$, а удельное сопротивление проволоки $\rho=1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

Ответ: 2,92 А.

13. Сравнить удельные потери теплоты с двух горизонтально расположенных паропроводов диаметрами $d_1=200 \text{ мм}$ и $d_2=100 \text{ мм}$, если температуры их стенок одинаковы и равны $t_n=310^\circ \text{C}$, а температура воздуха вдали от паропроводов $t_c=26^\circ \text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1=8,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $\alpha_2=9,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Ответ: паропровод большего диаметра теряет тепла больше на 11,5 %.

14. Отопление помещения производится горизонтальным трубопроводом с наружным диаметром 25 мм, обогреваемым конденсирующимся паром. Температура наружной поверхности трубопровода $t_n=104^\circ \text{C}$, температура в помещении $t_c=22^\circ \text{C}$. Определить необходимую длину трубопровода, если расчётная мощность отопительной системы $P=1,5 \text{ кВт}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha=10,17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Ответ: 22,9 м.

15. Один из способов экспериментального определения вязкости среды заключается в определении усилия, которое требуется преодолевать при вращении в этой среде (с определенной скоростью) легкого металлического цилиндра. Определить вязкость жидкости, если для вращения цилиндра со скоростью $n=1,6 \text{ с}^{-1}$ в жидкости, заполняющей стакан радиусом $R_{01}=13 \text{ см}$, требуется преодолевать сопротивление $F=6 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$. Размеры погруженного в жидкость цилиндра равны: радиус $R_{02}=3 \text{ см}$, высота $h=10 \text{ см}$.

16. Тепловыделяющий элемент нагревательного устройства представляет собой фарфоровую трубку с внутренним радиусом $R_{01}=10 \text{ мм}$ и толщиной стенки $\delta=2 \text{ мм}$, нагреваемую внутренним токонесущим стержнем с удельным сопротивлением материала $\rho=4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Найти перепад температур на стенках трубки, если по стержню идет ток $I=100 \text{ А}$. Теплопроводность фарфора $\lambda=1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

17. Водород диффундирует через пластину из медно-палладиевого сплава при температуре $t=327 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении на противоположных сторонах пластины 6 и 1 атм. Соответственно определить, какую площадь S должна иметь пластина толщиной $\delta=0,2 \text{ мм}$, чтобы обеспечить поток водорода $0,002 \text{ моль/ч}$. Коэффициент диффузии водорода через сплав составляет $D=10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Ответ: 11 см^2 .

18. Плотность диффузионного потока водорода через никелевую пластину толщиной $\delta=1 \text{ мм}$ при температуре $t=627 \text{ }^\circ\text{C}$ и перепаде давлений по обе стороны пластины $\Delta p=1 \text{ атм}$ составляет 10 микролитров (при $0 \text{ }^\circ\text{C}$) на см^2 за минуту. Определить коэффициент диффузии D водорода через никель.

Ответ: $5,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

19. Пластинка окиси магния (MgO) протравливается в проточном растворе серной кислоты с концентрацией $C_0=1$ моль/л. Процесс растворения окиси магния лимитируется диффузией серной кислоты из глубины раствора к поверхности пластины (коэффициент диффузии H_2SO_4 в воде $D=2\cdot 10^{-9}$ м²/с). Сколько миллиметров окиси магния стравится за 5 мин, если распределение концентрации кислоты по глубине раствора имеет вид, показанный на рис. 3

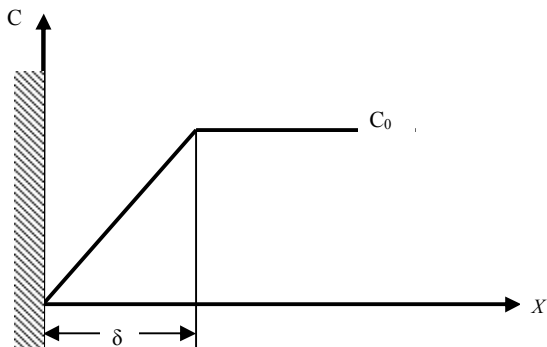


Рис. 3

Толщина диффузионного слоя $\delta=2$ мм. Плотность окиси магния $\rho=3600$ кг/м³, а ее молярная масса $M=40$ г/моль.

Указание. Толщина стравленного слоя Δ связана с потерей массы оксида магния соотношением $\Delta=m/2\rho S$.

Ответ: 1,66 мкм.

20. Ампула, заполненная аргоном и содержащая на одном конце навеску бора, а на другом - навеску йода, нагревается в печи до температуры 400 К. При этой температуре протекает реакция: $\text{B}^{\text{TB}}+3/2\text{J}_2^{\text{Г}}=\text{BJ}_3^{\text{Ж}}$, скорость которой лимитируется диффузией паров йода с одного конца ампулы в другой. Определить, какое количество трийодида

бора образуется за один час, если при этой температуре давление паров йода $p=200$ мм рт. ст., а коэффициент диффузии паров йода в аргоне $D=1,3 \cdot 10^{-5}$ см²/с. Диаметр ампулы $2R_0=3$ см, расстояние между месторасположением навесок $l=10$ см. Молярные массы йода и бора принять равными 127 г/моль и 11 г/моль. Считать пары йода идеальным газом.

21. Чистый водород получают диффузией этого газа через палладий при повышенных температурах. Определить массовую (в молях за час) и объемную (в литрах за минуту) производительность палладиевой мембраны радиусом $R_0=10$ см и толщиной $\delta=0,1$ мм, если давления водорода по обе стороны от мембраны $p_1=5$ атм и $p_2=1$ атм. Рабочая температура палладиевого диффузора $t_1=527$ °С, коэффициент диффузии водорода через палладий при этой температуре $D=3 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Температура чистого водорода, выходящего из диффузора, $t_2=27$ °С. Считать водород идеальным газом.

22. Коэффициент диффузии урана в графите при 1800 °С составляет $3,14 \cdot 10^{-11}$ см²/с. Определить количество урана, переходящее в графит через 1см² поверхности за час, если диффузия происходит из источника с постоянной концентрацией урана 10мг/см³.

23. На толстой пластинке кремния создан источник бора с постоянной концентрацией 10 атм/см². Пластика подвергается диффузионному отжигу в течение одного часа при 1300 °С. Определить коэффициент диффузии бора в кремнии при этой температуре, если после отжига концентрация бора на расстоянии $x=10$ мкм от поверхности составляет 10 атм/см³.

24. Галлий диффундирует в толстую пластинку кремния при температуре 1100 °С в течение трех часов. Какова

концентрация галлия на расстоянии $x=4$ мкм от поверхности, если коэффициент диффузии галлия в кремнии при этой температуре $D=7 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$, а поверхностная концентрация галлия поддерживается постоянной $10 \text{ атм}/\text{см}^2$.

25. Фосфор диффундирует в слиток кремния из источника с постоянной концентрацией $10 \text{ атм}/\text{см}^2$. Определить количество атомов фосфора, проникающих в кремний через 1 см поверхности за $31,4$ мин, если диффузия происходит при температуре $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, при которой коэффициент диффузии фосфора в кремнии $D=1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$. Начальная концентрация фосфора в кремнии составляет $10 \text{ атм}/\text{см}^3$.

Тесты по теме 1

1. Укажите точное определение теплового потока через границу раздела двух сред(тел):

а) энергия, передаваемая через единицу площади за время процесса;

б) энергия, передаваемая через заданную площадь в единицу времени;

в) мощность, передаваемая через единицу площади;

г) мощность, передаваемая через заданную площадь за время процесса.

2. Какова размерность теплового потока в СИ:

а) Дж; б) Дж/м²; в) Вт; г) Вт/м².

3. Укажите правильное определение плотности теплового потока через границу раздела двух сред (тел):

а) энергия, передаваемая через единицу площади за время процесса;

б) энергия, передаваемая через заданную площадь в единицу времени;

в) мощность, передаваемая через единицу площади;

г) мощность, передаваемая через заданную площадь за время процесса.

4. Какова размерность плотности теплового потока в СИ:

а) Дж; б) Дж/м²; в) Вт; г) Вт/м².

5. Укажите неправильное положение о механизмах теплопроводности:

а) в газах теплопроводность осуществляется путём обмена энергией при упругом соударении молекул, имеющих различную скорость теплового движения;

б) в жидкостях и твердых диэлектриках теплопроводность осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения молекул и атомов соседним частицам вещества, передачей упругих волн колебаний кристаллической решетки;

в) в металлах теплопроводность осуществляется главным образом движением свободных электронов, а также передачей колебаний кристаллической решетки;

г) наиболее эффективным механизмом теплопроводности является обмен энергией при упругом соударении молекул идеального газа.

6. К сложному теплообмену относятся следующие виды переноса теплоты (укажите неправильный ответ):

а) радиационно-кондуктивный теплообмен;

б) радиационно-конвективный теплообмен;

в) кондукционная теплопроводность.

7. Укажите неправильное положение о видах сложного теплообмена:

а) радиационно-кондуктивный теплообмен представляет совокупность теплообмена излучением и теплопроводностью;

б) радиационно-конвективный теплообмен включает в себя теплообмен излучением и свободную конвекцию;

в) теплоотдача - это теплообмен между текучей средой и твердой поверхностью тела;

г) теплопередача - это теплообмен между двумя жидкими или газообразными средами, разделенными твердой стенкой.

8. Укажите неверное положение о температурном поле:

а) температурным полем называют совокупность мгновенных значений температуры t во всех точках изучаемого пространства;

б) температурное поле, изменяющееся во времени, называется нестационарным или неустановившимся;

в) температурное поле можно представить совокупностью изотермических поверхностей - геометрическим местом точек с одинаковой температурой;

г) градиентом температуры называют физическую величину, численно равную разности температур между двумя точками в стационарном температурном поле.

9. Укажите правильное определение градиента температуры:

а) это скалярная физическая величина, численно равная разности температур между двумя заданными точками;

б) это векторная величина, направленная по нормали к изотерме в сторону увеличения температуры и равная по модулю производной от температуры по нормали к изотерме;

в) это скалярная величина, численно равная отношению разности температур между двумя точками к расстоянию между этими точками;

г) это векторная величина, направленная по нормали к изотерме в сторону понижения температуры и равная по модулю производной от температуры по нормали к изотерме.

10. Укажите точное определение потока массы через границу раздела двух сред (тел):

а) масса i -го компонента, передаваемая через единицу площади за время процесса;

б) масса i -го компонента, передаваемая через произвольную площадь за единицу времени;

в) масса i -го компонента, передаваемая через единицу площади за единицу времени;

г) векторная величина, численно равная отношению массы i -го компонента, передаваемая за единицу времени через заданную площадь к величине этой площади.

11. Какова размерность потока массы в СИ:

а) $\text{кг} \cdot \text{с}$; б) $\text{кг}/\text{м}^2$; в) $\text{кг}/\text{с}$; г) $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

12. Укажите правильное определение плотности потока массы через границу раздела двух сред (тел):

а) масса i -го компонента, передаваемая через единицу площади за время процесса;

б) масса i -го компонента, передаваемая через произвольную площадь за единицу времени;

в) масса i -го компонента, передаваемая через единицу площади за единицу времени;

г) векторная величина, численно равная отношению массы i -го компонента, передаваемая за единицу времени через заданную площадь к величине этой площади и направленная в сторону уменьшения концентрации этого компонента.

13. Какова размерность плотности потока массы в СИ:

а) $\text{кг} \cdot \text{с}$; б) $\text{кг}/\text{м}^2$; в) $\text{кг}/\text{с}$; г) $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

14. Укажите уравнение, выражающее закон Фурье, которое можно использовать для расчёта плотности теплового потока в нестационарном температурном поле:

а) $dQ/dS = -\lambda(dT/dn) dt$;

б) $dQ = -\lambda(dT/dn)(dt/dS)$;

в) $\Delta Q = -\lambda(\Delta T/\Delta n)\Delta S\Delta t$;

г) $dQ = -\lambda(dt/dn) dS dT$.

15. Укажите неверное утверждение, относящееся к определению коэффициента теплопроводности какого-либо тела:

а) коэффициент теплопроводности - физическая величина, численно равная плотности теплового потока в любой точке тела при температурном градиенте $1 \text{ К}/\text{м}$; б) коэффициент теплопроводности – физическая величина, численно равная среднему тепловому потоку через поверхность тела при температурном градиенте $1 \text{ К}/\text{м}$;

б) коэффициент теплопроводности зависит от химического состава тела;

в) коэффициент теплопроводности зависит от температуры тела.

16. Укажите два правильных положения, относящихся к концентрационной диффузии:

а) в стационарном температурном поле и при постоянном давлении плотность потока массы i -го компонента в направлении нормали к изоконцентрате выражается законом Фика:

$$q_{mi} = -D(dC_i/dn);$$

б) плотность потока массы i -го компонента в изотермической среде зависит только от градиента концентрации;

в) градиент концентрации i -го компонента в какой-либо среде имеет размерность кг/м^4 ;

г) коэффициент молекулярной диффузии характеризует поток массы i -го компонента при единичном температурном градиенте.

17. Укажите одно неверное положение, относящееся к теплоотдаче:

а) плотность теплового потока при конвективном теплообмене между поверхностью тела и окружающей текучей средой определяется уравнением теплоотдачи $q_k = \alpha(T_n - T_c)$;

б) плотность теплового потока при конвективной теплоотдаче определяется скоростью течения среды, её плотностью и температурным напором;

в) коэффициент теплоотдачи характеризует плотность теплового потока на границе текучей среды и соприкасающегося с ней тела при единичном тепловом напоре;

г) тепловой поток при конвективном теплообмене может быть рассчитан по закону Ньютона-Рихмана $d\Phi = \alpha(T_n - T_c)dS$.

18. Размерность коэффициента теплоотдачи в СИ:

а) Дж·К/м²·с; б) Вт/м²·К; в) Дж·К/м²; г) Дж/ м²·К.

2. ТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ И ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Основные понятия и закономерности:

♦ течение жидкости, линии тока, трубка тока, струя, поток, расход жидкости (объёмный и массовый), объёмная и массовая скорость потока.

♦ установившееся (стационарное) и неустановившееся течение, уравнение неразрывности потока, режимы течения – ламинарный и турбулентный, критерий Релея, статическое, динамическое и гидростатическое давление жидкости в трубке тока, уравнение Бернулли.

♦ практическое значение уравнения Бернулли, трубки Пито, трубка Вентури, скорость истечения жидкости из открытого сосуда.

♦ течение вязкой жидкости, динамическая и кинематическая вязкость, формула Пуазейля, гидравлическое сопротивление трубы, потеря напора, линейное и местное сопротивление (потери напора), формулы для расчёта линейных и местных потерь напора.

♦ поправки в уравнении Бернулли для вязкой жидкости, безразмерные параметры для описания течения вязкой жидкости – коэффициент скорости, коэффициент сопротивления отверстия, коэффициент сжатия отверстия, коэффициент расхода, формула для расхода вязкой жидкости через отверстие.

Задачи

1. Найти давления в сечениях трубопровода (1,2 и 3), указанных на рис. 4, если расход воды по трубопроводу $Q = 2,5$ л/с, а истечение жидкости происходит в атмосферу ($p_{\text{атм}} = 1$ атм). Действием сил вязкости пренебречь.

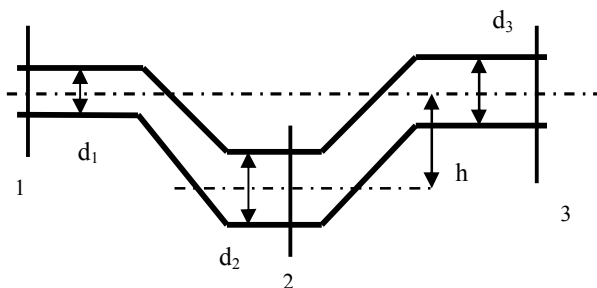


Рис. 4

2. Определить расход нефти ($\rho=850 \text{ кг/м}^3$), протекающей по трубопроводу, имеющему сужение (рис. 5), если $d_1=15 \text{ см}$, $d_2=10 \text{ см}$ и разность уровней в ртутном дифференциальном пьезометре $\Delta h=15 \text{ мм}$.

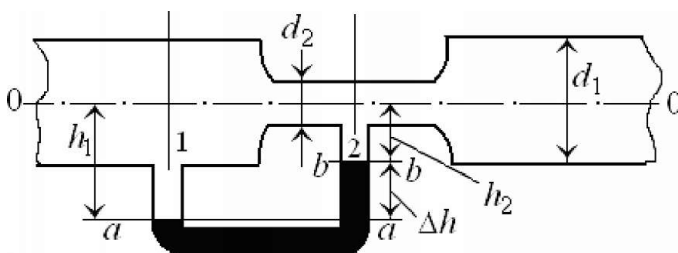


Рис. 5

Потерями напора пренебречь.

3. Вода вытекает из открытого бака через малое отверстие в дне ($d=10 \text{ мм}$). Определить высоту уровня воды в баке, если расход $Q=0,48 \text{ л/с}$. Силами вязкости пренебречь.

4. При истечении жидкости под постоянным напором $H=1,70 \text{ м}$ из круглого отверстия ($d_0=12 \text{ мм}$) в атмосферу диа-

метр струи в сжатом сечении оказался равным $d_c = 9,6$ мм. Поставленный под струю мерный бак объёмом $V = 10$ л наполнился за время $t = 25$ с. Определить коэффициенты μ^* , ε , φ и ξ .

5. Определить режим движения воды при 4°C по трубопроводу диаметром $d = 5$ см, если скорость $v_{cp} = 1$ м/с. Кинематический коэффициент вязкости воды при указанной температуре $\nu = 1,57 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

6. Определить потерю напора при движении топливной смеси, имеющей коэффициент вязкости $\nu = 0,059$ Н·с/м² и плотность $\rho = 920$ кг/м³ по трубопроводу длиной $l = 15$ м и диаметром $d = 100$ мм, если расход топлива $Q = 25$ т/ч.

7. На водопроводной трубе диаметром $d_1 = 10$ см установлен водомер в виде сужения диаметром $d_2 = 5$ см (рис. 6). Нормальное сечение 1 - 1 и суженное сечение 2 - 2 снабжены пьезометрическими трубками. Отметки свободной поверхности в пьезометрах $H_1 = 0,8$ м и $H_2 = 0,5$ м.

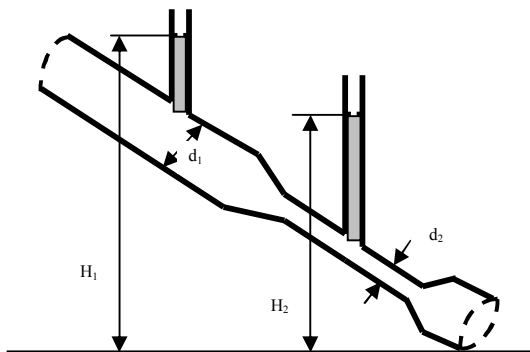


Рис. 6

Определить расход воды в трубе, пренебрегая потерями напора.

Ответ: $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$.

8. На какую высоту h может засасываться вода из резервуара по трубке, присоединенной к узкому сечению горизонтального трубопровода (рис. 7), если расход воды по нему $Q=2,7 \text{ л/с}$; диаметры $d_1=5 \text{ см}$, $d_2=2,5 \text{ см}$, а избыточное давление $p_1=0,08 \text{ атм}$. Потери напора не учитывать.

Ответ: $9,2 \text{ м}$.

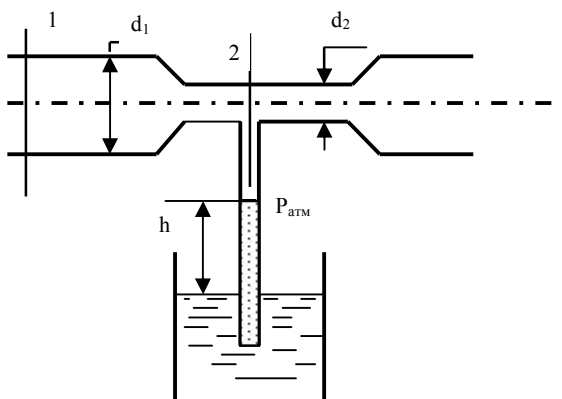


Рис. 7

9. В водопроводной трубе ($h=150 \text{ мм}$) установлена трубка Пито с дифференциальным ртутным манометром, показывающим разность уровней $\Delta h=20 \text{ мм}$ (рис. 8). Считая $v_{\text{ср}}=\beta v_{\text{max}}$, где β – коэффициент перехода, принятый $\beta=0,84$, определить расход воды, протекающей по трубе. Потерями напора пренебречь.

Ответ: $61,5 \text{ л/с}$.

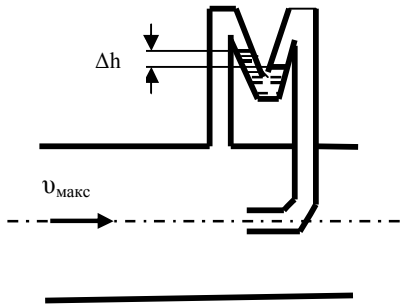


Рис. 8

10. Цилиндрические трубы А и В одинакового диаметра $d_1=0,1$ м соединяются с цилиндрической вставкой диаметром $d_2=0,05$ м с помощью двух конических участков (рис. 9). На участках А и С имеются пьезометрические трубки, позволяющие отсчитывать разность пьезометрических высот.

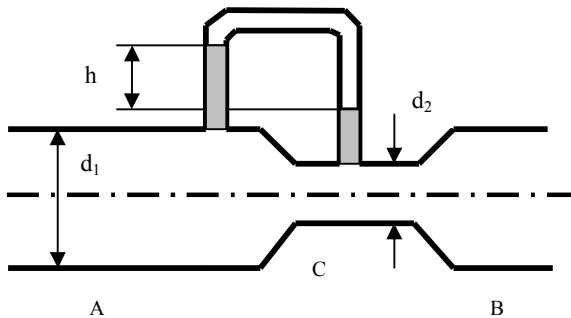


Рис. 9

Определить расход воды в трубах, пренебрегая потерями напора, если $h=1,0$ м.

Ответ: 287 л/с.

11. Предполагая уровень воды в сосуде постоянным, определить расход воды Q и распределение пьезометрических высот в сечениях: 0 - 0, 1 - 1, 2 - 2 и 3 - 3, пренебрегая сопротивлениями (рис. 10), если $z_0=4$ м, $z_1=2$ м, $z_2=0,5$ м, $S_0=1$ м², $S_1=0,015$ м², $S_2=0,04$ м², $S_3=0,02$ м².

Ответ: 0,1 м³/с; $p/\rho g=10$ м; 9,75 м; 9,31 м и 8,85 м.

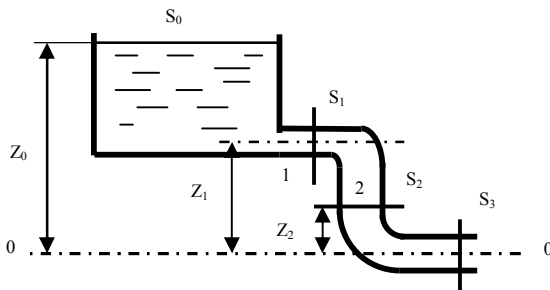
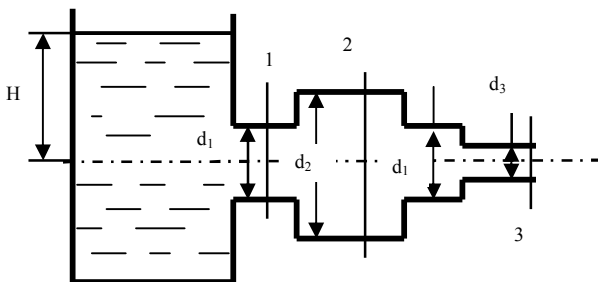


Рис. 10

12. Определить расход воды по трубопроводу переменного сечения (рис. 11) и скорость на каждом из участков, если $H=5$ м, $d_1=15$ мм, $d_2=20$ мм и $d_3=10$ мм. Потери напора не учитывать.



Ответ: 0.88 л/с; 4,98 м/с; 2,8 м/с; 11,2 м/с.

Рис. 11

13. Будет ли понижаться уровень топлива в цистерне, если производительность насоса, подающего топливо в цистерну, равна $2,0 \text{ т/ч}$, диаметр отверстия $d=20 \text{ мм}$, а начальный уровень в цистерне 1 м . Коэффициент расхода $\mu^*=0,65$. Плотность топлива $\rho=0,93 \text{ т/м}^3$.

Ответ: $9,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Будет понижаться.

14. Определить пропускную способность (расход Q) трубы диаметром $d=2,26 \text{ м}$, расположенной в теле водоудерживающей плотины, если напор над центром тяжести отверстия трубы $H=8 \text{ м}$. Принять $\mu^*=0,61$, как в случае отверстия в тонкой стенке.

Ответ: $31 \text{ м}^3/\text{с}$.

15. Определить расход воды, вытекающей из бака 1 в бак 2 через круглое отверстие диаметром $d=0,1 \text{ м}$, расположенное в дне бака 1 (рис. 12), если уровни воды в обоих баках постоянны, причем $h_1=2 \text{ м}$, $h_2=1,5 \text{ м}$, $\mu^*=0,61$.

Ответ: $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$.

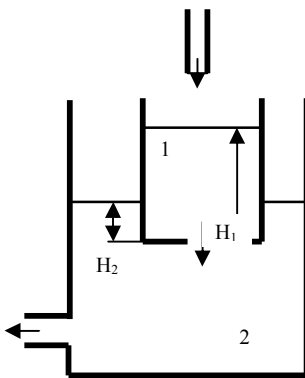


Рис. 12

16. Бак, употребляющийся для измерения расхода и сжатия струи, вытекающей в атмосферу через круглое отверстие в тонкой боковой стенке диаметром $d_2=0,2$ м, снабжен для успокоения воды вертикальной перегородкой с круглым отверстием диаметром $d_1=0,1$ м (рис.13). Определить расход Q и распределение напоров h_1 , h_2 , если полный напор над центром тяжести наружного отверстия $H=2$ м поддерживается постоянным, а $\mu^*=0,61$.

Ответ: $29,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

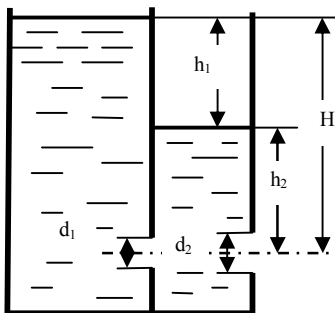


Рис. 13

17. Определить количество воды, вытекающей из бака через отверстие в его дне ($d=10$ мм), в течение 3 мин при уровне воды в баке, равном $0,36$ м. Уровень поддерживается постоянным. Давление на поверхность воды в баке в три раза превосходит атмосферное. Принять коэффициент расхода $\mu^*=0,64$.

Ответ: $186,3$ л.

18. Истечение воды в атмосферу через отверстие ($d=10$ мм) происходит под напором $H=2$ м. Определить коэффициент сжатия струи, если расход $Q=0,294$ л/с. Принять коэффициент сопротивления отверстия равным $\xi=0,065$.

Ответ: $0,614$.

19. Вода выливается из открытого сосуда через малое отверстие в тонкой стенке диаметром $d=15$ мм при постоянном напоре $H=1$ м в атмосферу. Определить коэффициент сопротивления ξ отверстия, если расход $Q=486$ см³/с, а диаметр струи в сжатом состоянии $d=12$ мм.

Ответ: 0,61; 0,96; 0,635; 53 с.

20. Жидкость вытекает из открытого бака при постоянном напоре $H=1,5$ м через малое отверстие диаметром $d=12$ мм в дне. Определить коэффициенты расхода, скорости и сжатия струи, а также время заполнения бака емкостью 20 л, подставленного под струю, если время заполнения того же бака при $H=1,0$ м и $d=10$ мм составило 93 с. Принять коэффициент сопротивления $\xi = 0,065$.

Ответ: 0,61; 0,96; 0,635; 53 с.

21. В верхний сосуд поступает вода ($Q=0,25$ л/с), которая затем перетекает через малое отверстие в дне диаметром $d_1 = 10$ мм в нижний сосуд, имеющий также малое отверстие в дне диаметром $d_2=15$ мм (рис. 14). Принять $\mu^*=0,62$ в обоих случаях. Определить: а) напоры H_1 и H_2 в обоих сосудах; б) при каком диаметре d_2 напор H_2 будет вдвое меньше, чем H_1 .

Ответ: а) 1,32 м и 0,26 м. б) 11,9 мм.

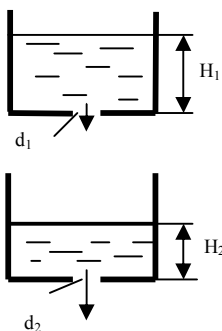


Рис.14

22. Каков режим движения мазута в трубопроводе диаметром 10 см, если коэффициент вязкости мазута $\mu=587 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, а расход составляет $Q=2 \text{ л/с}$. Плотность мазута $\rho=950 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $Re < Re_{кр}$; ламинарный режим.

23. Каков может быть максимальный расход в трубопроводе диаметром $d=80 \text{ мм}$, чтобы при протекании в нем воды ($\nu=1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) наблюдался устойчивый ламинарный режим движения?

Ответ: 145,7 л/с.

24. Определить скорости, при которых сохраняется устойчивый ламинарный режим при протекании мазута ($\nu=0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$) и воды ($\nu=1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) по трубопроводу диаметром $d=100 \text{ мм}$?

Ответ: 1,38 м/с; 0,025 м/с.

25. Каков режим движения мазута по трубе диаметром $d=110 \text{ мм}$, если производительность насоса, с помощью которого его откачивают, составляет $Q=5 \text{ т/ч}$. Вязкость мазута $\mu=0,064 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

Ответ: $Re=258$; ламинарный режим.

26. Определить, при какой скорости движения воды в трубе диаметром $d=100 \text{ мм}$ будет иметь место ламинарный режим движения ($\nu=1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)?

Ответ: 0,036 м/с.

27. По трубопроводу длиной $l=500 \text{ м}$ и диаметром $d=100 \text{ мм}$ протекает жидкость со средней скоростью $v_{ср}=0,4 \text{ м/с}$. Кинематическая вязкость жидкости $\nu=0,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а плотность $\rho=1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Определить режим движения, коэффициент сопротивления λ и сопротивление Δp .

Ответ: ламинарный режим; 0,064 атм; 0,25 атм.

28. По горизонтальному трубопроводу (диаметром $d=200$ мм и $l=24000$ м) перекачивается жидкость, имеющая плотность $\rho=850$ кг/м³ и вязкость $\nu=1,3 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Определить массовый расход Q , если перепад давления в трубопроводе составляет $\Delta p=9,5 \cdot 10^5$ Н/м².

Ответ: $0,046$ м³/с.

29. При движении жидкости по стальной трубе диаметром $d=300$ мм было найдено, что при скоростях выше $2,6$ м/с коэффициент сопротивления λ остается постоянным и равным $0,016$. Вязкость жидкости $\nu=1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Пользуясь этими данными, определить среднюю шероховатость трубы Δ .

Ответ: $1,43$ мм.

30. Трубопровод был рассчитан на перекачку жидкости с плотностью $\rho=900$ кг/м³ и кинематической вязкостью $\nu=1,5 \cdot 10^{-3}$ м²/с. После его сооружения выяснилось, что жидкость имеет плотность $\rho=880$ кг/м³ и вязкость $\mu=1$ Н·с/м². Определить, полагая течение ламинарным и перепад давления постоянным, во сколько раз при этом придется изменить объемный расход?

31. Определить массу нефти, проходящую через самотёчный нефтепровод диаметром $d=20$ см и длиной $L=10$ км. Кинематическая вязкость нефти $\nu=1,46 \cdot 10^{-4}$ м²/с, плотность $\rho=900$ кг/м³. Разность уровней входного и выходного сечений $\Delta h=5$ м.

32. По горизонтальной трубе течёт вязкая жидкость (рис. 15). Разность уровней этой жидкости в измерительных трубках а и б равна Δh , в трубках а и с - Δl . Объём жидкости, протекающей за 1 с равен V . Расстояние между трубками а и с равно L . Плотность жидкости ρ . Определить динамическую вязкость жидкости (скорость течения по сечению трубы считать одинаковой).

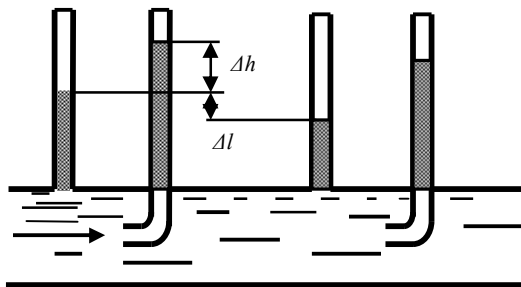


Рис. 15

33. Сопло фонтана, дающего вертикальную струю высотой 8 м, имеет форму усечённого конуса, сужающегося вверх. Диаметр нижнего основания 5 см, верхнего 1 см. Высота сопла 0,5 м. Определить расход воды, подаваемой фонтаном, насколько давление в нижнем сечении больше атмосферного. Сопротивлением воздуха в струе и сопротивлением в сопле пренебрегите.

Ответ: $\approx 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 83,3 кПа.

34. Определите наибольшую величину диаметра трубы, при котором на достаточном удалении от входа будет иметь место ламинарное течение, если через поперечное сечение трубы протекает 2 л/с керосина с кинематической вязкостью $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Какова при этом средняя скорость течения керосина?

Ответ: 0,255 м; $\approx 4 \text{ см/с}$.

35. Горизонтальный цилиндр насоса имеет диаметр $d_1=20 \text{ см}$. В нём движется поршень со скоростью 1 м/с, выталкивая воду через отверстие диаметром $d_2=2 \text{ см}$. Определите скорость вытекания воды; давление воды в цилиндре насоса.

Ответ: 100 м/с; 5 МПа.

36. Схема устройства пульверизатора изображена на (рис. 16). Добавочное давление перед входом в трубку А, где

скорость очень мала, равно 1,2 кПа. Определите максимальную высоту h , на которую пульверизатор может засасывать спирт из сосуда. Вязкостью воздуха пренебрегите.

Ответ: 0,153 м.

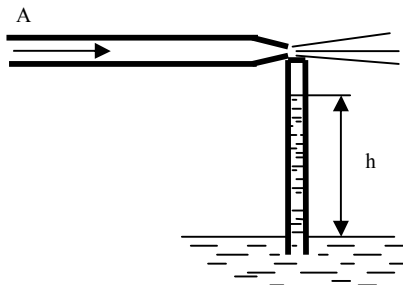


Рис. 16

37. На рис. 17 представлена схема водомера. По горизонтальной трубе переменного сечения протекает вода. Сечение горизонтальной трубы у основания трубок равно S_1 и S_2 . Определите расход воды по разности уровней воды h в манометрических трубках. Вязкостью воды пренебрегите.

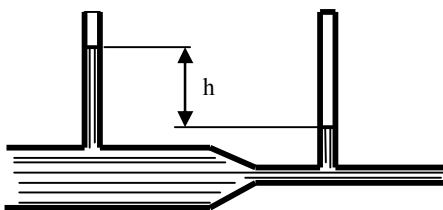


Рис. 17

38. В трубопроводе происходит плавное изменение площади поперечного сечения от S_1 к S_2 ($S_2 > S_1$). В каком из этих сечений число Рейнольдса будет больше?

39. На (рис. 18) схематически изображена установка, демонстрирующая течение вязкой жидкости по горизонтальной трубе. Манометрические трубки впаяны в трубу на равных расстояниях $a=10$ см. Высота уровня жидкости в широком сосуде $H=26$ см. Прямая АВ, проведённая через уровни жидкости в манометрических трубках, образует с горизонтальной трубой угол $\alpha=30^\circ$. Определите скорость вытекания жидкости.

Ответ: 0,755 м/с.

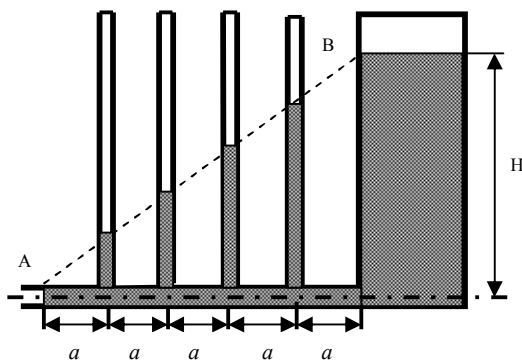


Рис. 18

40. Трубка Пито установлена по оси газопровода диаметром d (рис. 19). Разность уровней в спиртовом манометре Δh , плотность спирта ρ_s , плотность газа ρ . Определить объёмный расход газа.

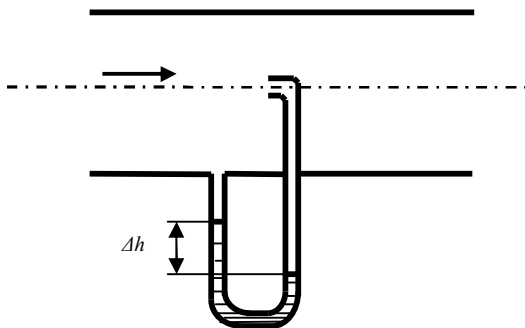


Рис. 19

Тесты по теме 2

1. Укажите одно неверное определение понятий, использующихся для описания течения жидкости:

а) линия тока – это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением скорости частиц жидкости;

б) трубка тока - это канал, по которому течёт рассматриваемая жидкость;

в) стационарным (установившимся) называется такое течение жидкости, при котором форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой её точке со временем не изменяются;

г) условие неразрывности струи основано на законе сохранения массы вещества.

2. Укажите одно неверное определение параметров потока жидкости:

а) объёмная скорость потока – это объёмный расход жидкости через единицу площади живого сечения;

б) массовая скорость потока – это массовый расход жидкости через единицу площади живого сечения;

в) массовый расход жидкости измеряется в $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$;

г) расходом жидкости называется количество жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока.

3. Укажите два верных положения о числе Рейнольдса:

а) число Рейнольдса характеризует режим течения жидкости;

б) число Рейнольдса не зависит от вязкости жидкости;

в) переход от ламинарного режима течения к турбулентному в трубе круглого сечения происходит при $Re = 2300$;

г) при уменьшении поперечного сечения трубы, по которой течёт идеальная жидкость, число Рейнольдса не изменяется.

4. В трубопроводе происходит плавное увеличение площади поперечного сечения. Число Рейнольдса при этом:

а) возрастает;

б) уменьшается;

в) не изменяется?

5. В трубопроводе происходит плавное уменьшение диаметра поперечного сечения. На основе уравнения неразрывности струи определите, во сколько раз изменится скорость течения жидкости при уменьшении диаметра в 3 раза:

- а) увеличится в 3 раза;
- б) увеличится в 9 раз;
- в) уменьшится в 3 раза;
- г) не изменится.

6. В каких единицах СИ измеряется объёмная скорость потока жидкости:

- а) $\text{м}^3/\text{с}$; б) $\text{м}/\text{с}$; в) $\text{м}^2/\text{с}$; г) $\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

7. Укажите два верных положения, относящиеся к закону Бернулли:

а) статическое давление при движении жидкости в трубке тока выше в том сечении, в котором скорость течения выше;

б) для любого сечения трубки тока сумма статического, динамического и гидростатического давления есть величина постоянная;

в) в горизонтальной трубке тока для любого сечения сумма удельной энергии давления и удельной кинетической энергии постоянна;

г) уравнение Бернулли справедливо для реальной жидкости.

8. Какое из нижеприведённых утверждений для вязких жидкостей не является достоверным:

а) в соответствии с законом Ньютона для внутреннего трения сила трения между двумя слоями жидкости, движущимися с различной скоростью, зависит от природы жидкости и прямо пропорционально площади соприкасающихся слоёв и градиенту скорости между ними;

б) коэффициент динамической вязкости в СИ измеряется в Па/с;

в) коэффициент кинематической вязкости в СИ измеряется в $\text{м}^2/\text{с}$;

г) ньютоновскими жидкостями называются такие жидкости, у которых коэффициент вязкости зависит от природы жидкости, от температуры и не зависит от режима течения.

9. Какие два из приведённых ниже утверждений неверны:

а) неньютоновскими жидкостями в гидродинамике называют такие жидкости, которые не подчиняются закону Ньютона для внутреннего трения;

б) неньютоновскими жидкостями называются такие жидкости, для которых коэффициент вязкости зависит от режима течения;

в) при турбулентном режиме происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание слоёв жидкости;

г) при ламинарном режиме скорости движения всех слоёв жидкости одинаковы.

10. Реальная жидкость течёт через горизонтальную трубу круглого постоянного сечения длиной l при постоянном напоре $P_1 - P_2$ на её концах. Укажите, какие факторы влияют на объёмный расход жидкости:

а) радиус трубы, напор, коэффициент вязкости;

б) радиус трубы, напор, температура, длина трубы;

в) радиус трубы, напор, длина трубы, коэффициент вязкости;

г) коэффициент вязкости, напор, температура.

11. Реальная жидкость течёт через горизонтальную трубу круглого постоянного сечения длиной l при постоянном напоре P_1 - P_2 на её концах. Как изменится объёмный расход через трубу, если её диаметр увеличить в 2 раза, а напор уменьшить в 2 раза? :

а) увеличится в 2 раза;

б) увеличится в 4 раза;

в) увеличится в 8 раз;

г) не изменится.

12. Реальная жидкость течёт через горизонтальную трубу круглого постоянного сечения длиной l и радиусом R . Как изменится гидравлическое сопротивление трубы, если её длину увеличить в 1,5 раза, а радиус уменьшить в 2 раза?:

а) увеличится в 3 раза;

б) уменьшится на четверть;

в) увеличится в 24 раза;

г) увеличится в 6 раз.

13. Линейное сопротивление гладкой трубы длиной l и диаметром d при течении в ней жидкости с плотностью ρ со скоростью v определяется эмпирической формулой Дарси, в которую помимо указанных величин входит коэффициент сопротивления трения $\lambda_{тр}$. Укажите правильную запись формулы Дарси:

а) $h_d = \lambda_{тр}(l/d)(v^2/2)\rho$;

б) $h_d = \lambda_{тр}(l/d)(v/2)^2\rho$;

$$\text{в) } h_{\text{л}} = \lambda_{\text{тр}}(d/l)(v^2/2)\rho;$$

$$\text{г) } h_{\text{л}} = \lambda_{\text{тр}}(l/d)^2(v^2/2)\rho.$$

14. При движении жидкости по шероховатым трубам в переходном режиме течения коэффициент сопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$ определяется по эмпирической формуле Альтшуля, в которую входят диаметр трубы d , абсолютная шероховатость k (средняя высота бугорков) и число Рейнольдса Re . Укажите правильную запись формулы Альтшуля:

$$\text{а) } \lambda_{\text{тр}} = 0,21\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25};$$

$$\text{б) } \lambda_{\text{тр}} = 0,11\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25};$$

$$\text{в) } \lambda_{\text{тр}} = 0,11\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re}\right)^2;$$

$$\text{г) } \lambda_{\text{тр}} = 0,11\left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,5}.$$

3. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Основные понятия и закономерности:

♦ поток излучения, плотность потока излучения, угловая плотность излучения, интенсивность (яркость) излучения, законы теплового излучения – закон Планка, закон Стефана-Больцмана, законы Вина, закон Кирхгофа, закон Ламберта;

♦ угловой коэффициент и взаимная поверхность излучения, эффективное излучение и метод сальдо-потоков, эффективная степень черноты двух тел, приведённый коэффициент излучения;

♦ примеры радиационного теплообмена между двумя серыми телами, экранирование как способ защиты от теплового излучения, радиационно-конвективный теплообмен.

Задачи

1. Определить поверхностную плотность потока излучения серой стенки с коэффициентом излучения $C=4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, если температура излучающей поверхности стенки $t = 1027^\circ \text{С}$. Найти также степень черноты стенки и длину волны, соответствующей максимальному излучению.

Ответ: $1,3 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 0,8; 2,23 мкм.

2. Определить поток излучением от стенки с площадью поверхности $S=4 \text{ м}^2$, если степень её черноты $\varepsilon=0,92$, а температура $t=1200^\circ \text{С}$.

3. Определить излучательную способность поверхности Солнца, если известно, что её температура равна 5700°С и условия излучения близки к излучению абсолютно чёрного тела. Вычислить также длину волны, при которой будет наблюдаться максимум спектральной интенсивности излучения и общее количество лучистой энергии, испускаемой Солнцем в единицу времени, если диаметр светила $1,391 \cdot 10^9 \text{ м}$.

Ответ: $7,22 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $4,4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$; 0,485 мкм.

4. Поверхность стального изделия имеет температуру $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ и степень черноты $\varepsilon=0,7$. Излучающую поверхность можно считать серой. Вычислить плотность потока излучения и длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной плотности излучения.

Ответ: $3,97\text{ кВт/м}^2$; $2,9\text{ мкм}$.

5. Найти максимальное значение спектральной интенсивности излучения для следующих тел: 1) Солнце; $\varepsilon=1$; $t=5700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) стальная отливка; $\varepsilon=0,7$; $t=727\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. Определить, какую долю излучения, падающего от абсолютно чёрного источника, будет отражать поверхность полированного алюминия при температуре $t=250\text{ }^{\circ}\text{C}$, если известно, что при этой температуре излучательная способность поверхности $q=170\text{ Вт/м}^2$. Температура источника чёрного излучения равна температуре поверхности алюминия.

Ответ: $0,96\text{ мкм}$.

7. Температура поверхности серого тела равна $827\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этой температуре максимальное значение спектральной интенсивности $E_{\lambda\text{max}}=1,37\cdot 10^{10}\text{ Вт/м}^3$. Определить степень черноты тела и длину волны, при которой наблюдается максимум спектральной интенсивности излучения.

Ответ: $0,655$; $2,64\text{ мкм}$.

8. Прибор для измерения высоких температур – оптический пирометр – основан на сравнении яркости исследуемого тела с яркостью нити накаливания специальной лампы. Прибор проградуирован по излучению абсолютно чёрного источника, поэтому он измеряет температуру, которую имело бы абсолютно чёрное тело при той же яркости излучения, какой обладает исследуемое тело. В пирометре используется красный светофильтр ($\lambda=0,65\text{ мкм}$). Какова истинная температура тела, если

пирометр зарегистрировал $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а степень черноты тела при $\lambda=0,65\text{ мкм}$ $\varepsilon=0,6$?

Ответ: $1466\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. Оптический пирометр с красным светофильтром (см. задачу 8) зарегистрировал температуру $t_0=1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти степень черноты исследуемого тела при $\lambda=0,65\text{ мкм}$, если известно, что истинная его температура $t = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $0,55$.

10. Найти мощность электрического тока, необходимую для накаливания нити диаметром 1 мм и длиной 20 см до температуры 3500 К . Считать, что нить излучает как чёрное тело. Потерями тепла на теплопроводность и конвекцию пренебречь.

Ответ: $5,3\text{ кВт}$

11. Температура вольфрамовой спирали в 25 ваттной электрической лампочке $T=2450\text{ К}$. Отношение её энергетической светимости к энергетической светимости чёрного тела $\varepsilon=0,3$. Найти площадь излучающей поверхности спирали.

Ответ: $0,4\text{ см}^2$.

12. Определить количество теплоты, теряемой за счёт излучения поверхностью расплавленной платины площадью 50 см^2 за 1 минуту , если поглощательная способность её равна $A_T=0,8$. Температура плавления платины $1770\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $237,1\text{ кДж}$

13. Определить энергию, излучаемую за 1 минуту из смотрового окошка плавильной печи площадью 8 см^2 , если температура в печи $T=1,2\text{ кК}$.

Ответ: $5,6\text{ кДж}$.

14. Определить поток излучения в малом зазоре между параллельными изотермическими пластинами площадью

$S=1 \text{ м}^2$. Температуры пластин $T_1=1000 \text{ К}$, $T_2=800 \text{ К}$. Степень черноты материала пластин $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,8$.

Ответ: 22,4 кВт.

15. Определить поток излучения трубки диаметром $d=2 \text{ см}$ и длиной $l=1 \text{ м}$, нагретой до температуры $60 \text{ }^\circ\text{С}$, в большом помещении с температурой $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Степень черноты материала трубки $\varepsilon=0,2$.

Ответ: 3,5 Вт.

16. Определить, во сколько раз уменьшается поток энергии излучения, если между серыми пластинами ($\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,8$) установлен экран с более высокой отражающей способностью ($\varepsilon_3=0,2$).

Ответ: 7.

17. Дымовые газы содержат 15 % углекислоты и 10 % водяного пара. Температура газа при входе в канал $T_{\text{г}}=1400 \text{ К}$, при выходе - $T_{\text{г}}=1100 \text{ К}$, температура поверхности газохода у входа газов $T_{\text{ст}}=900 \text{ К}$, у выхода - $T_{\text{ст}}=700 \text{ К}$. Степень черноты поверхности канала $\varepsilon_{\text{ст}}=0,85$. Общее давление дымовых газов равно 1 бар. Определить количество теплоты, передаваемое излучением от дымовых газов на 1 м^2 поверхности цилиндрического газохода диаметром $d=1 \text{ м}$.

Ответ: 22,4 кВт/м²

18. Определить коэффициент теплоотдачи излучением с поверхности металлической отливки в открытом пространстве при температуре $t_{\text{н}}=1000 \text{ }^\circ\text{С}$, степень черноты отливки $\varepsilon=0,8$, температура окружающей среды $t_{\text{с}}=20 \text{ }^\circ\text{С}$.

Ответ: 121 Вт/(м²·К).

19. Поверхность, покрытая слоем ламповой сажи, излучает в направлении нормали к плоской поверхности в единице телесного угла (стерадиан – ср) лучистую энергию

$I_{\psi}=1,87 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$. Поглощательная способность сажи для чёрного излучения $A=0,96$. Определить температуру этой поверхности, полагая, что для ламповой сажи выполняется закон Ламберта.

Ответ: $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

20. Искусственный спутник облетает Землю, находясь на её дневной стороне и имеет форму шара. Поглощательная способность поверхности спутника для падающего солнечного излучения равна A , а степень черноты ϵ . Определить температуру поверхности спутника. Внутри спутника источники теплоты отсутствуют, а температура во всех точках поверхности одинакова. Отражённым от Земли солнечным излучением и собственным излучением Земли пренебречь.

Ответ: $288(A/\epsilon)^{0,25} \text{ К}$.

21. Решить задачу 20, приняв, что поверхность спутника выполнена из металла, для которого $A=0,2$ и $\epsilon=0,1$.

Ответ: $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

22. Найти температуру поверхности спутника (задача 21), если поверхность серая ($A=\epsilon$).

Ответ: $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

23. Найти, каким должно быть соотношение между поглощательной способностью поверхности спутника для падающего солнечного излучения и её степени черноты (задача 2), чтобы температура поверхности была равна $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $A/\epsilon=1,225$.

24. Обмуровка топочной камеры парового котла выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка – из листовой стали. Расстояние между обшивкой и кирпичной кладкой равно 30 мм , и его можно считать малым по сравнению с размерами стен топки. Вычислить потери теплоты в окружающую среду с

единицы площади поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счёт лучистого теплообмена в зазоре между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности обмуровки $t_1=127\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура стальной обшивки $t_2=50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Степень черноты шамота $\varepsilon_{\text{ш}}=0,8$, а листовой стали $\varepsilon_{\text{с}}=0,6$.

Ответ: $435,6\text{ Вт/м}^2$.

25. Вычислить значения собственного, эффективного, отражённого и падающего излучений для поверхности шамотной кладки и стальной обшивки в условиях задачи 24.

26. Как изменятся тепловые потери в окружающую среду, если между обмуровкой котла и обшивкой топочной камеры, рассмотренной в задаче 24, установить стальной экран, имеющий степень черноты $\varepsilon_3=0,6$.

Ответ: в 2,2 раза.

27. Какой должна быть степень черноты экрана для того, чтобы при наличии одного защитного экрана между обмуровкой и стальной обшивкой тепловые потери в окружающую среду за счёт излучения не превышали 60 Вт/м^2 ? Все другие условия – как в задаче 24.

Ответ: 0,15.

28. Нагрев стальной болванки осуществляется в муфельной электрической печи с температурой её стенок $t_2=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Степень черноты поверхности стальной болванки $\varepsilon_1=0,8$ (средняя за период нагрева), и степень черноты шамотной стенки муфельной печи $\varepsilon_2=0,8$. Площадь поверхности печи, участвующей в лучистом теплообмене S_2 , существенно превышает площадь поверхности болванки S_1 ($S_1 \ll S_2$). Вычислить значение плотности лучистого потока в зависимости от температуры болванки в процессе её нагрева и постро-

ить график этой зависимости (взять к расчёту температуры t_1 : 20; 100; 300; 500; 700 °C)

29. Вычислить плотность лучистого потока между стенками печи и стальной отливкой в условиях, рассмотренных в задаче 28, если отношение площадей поверхностей $S_1/S_2=1/5$.

30. Температура поверхности выходного коллектора пароперегревателя высокого давления $t_k=500$ °C. Вычислить тепловые потери с 1 м неизолированного коллектора, если коэффициент поглощения $A_k=0,8$, а температура окружающей среды $t_c=30$ °C.

Ответ: 13,7 кВт/м.

31. Определить лучистый теплообмен между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки сосуда температура $t_1=183$ °C, а на внутренней поверхности наружной стенки $t_2=17$ °C. Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,02$. Площади поверхности стенок $S_1=S_2=0,1$ м².

Ответ: 0,4 Вт.

32. Определить коэффициент облучённости и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей оси (нормали). Температура поверхности дисков $t_1=300$ °C и $t_2=100$ °C; диски имеют одинаковый диаметр $d_1=d_2=300$ мм, расстояние между ними $h=500$ мм. Степень черноты дисков $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,24$.

Ответ: 0,08; 18,7 Вт.

33. Как изменятся угловой коэффициент и лучистый тепловой поток, если в условии задачи 32 расстояние между дисками уменьшить: а) в 2 раза; б) в 5 раз?

Ответ: 0,22; 0,52; 32,4 Вт; 42,8 Вт.

34. Вычислить угловой коэффициент и удельный тепловой поток при лучистом теплообмене между двумя параллельными полосами, расстояние между которыми $h = 3$ м. Ширина полос одинакова $a_1 = a_2 = 2$ м, а длина велика по сравнению с шириной. Степень черноты $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$, а температуры их поверхности $t_1 = 500$ °С и $t_2 = 200$ °С.

Ответ: 0,3; 9085 Вт/м.

35. В случае теплообмена излучением между двумя параллельными плоскостями, у которых температуры поверхностей $T_1 = 800$ К и $T_2 = 400$ К, степени черноты $\varepsilon_1 = 0,9$ и $\varepsilon_2 = 0,7$, средние угловые коэффициенты излучения $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$, требуется определить поверхностную плотность результирующего потока для этих условий, а также его величину в том случае, если степень черноты второй поверхности уменьшить до $\varepsilon_2 = 0,07$.

Ответ: 14140 Вт/м²; 1510 Вт/м².

36. По каналу, диаметр которого $d = 0,667$ м, движутся продукты сгорания, имеющие состав: $\text{CO}_2 = 15$ %; $\text{H}_2\text{O} = 10$ % и $\text{N}_2 = 75$ %. Температура газа $T_r = 1073$ К, а окружающего его канала $T_c = 473$ К. Степень черноты стенок $\varepsilon = 0,6$. Определить для данных условий поверхностную плотность результирующего потока излучения.

Ответ: 9,74 кВт/м².

Тесты по разделу «Радиационный теплообмен»

1. Как необходимо уменьшить температуру чёрного тела, чтобы ослабить его энергетическую светимость в 16 раз?

а) в 16 раз; б) на $1/16$; в) в 4 раза; г) в 2 раза.

2. Температуру чёрного тела необходимо понизить в 4 раза. Как уменьшится при этом его полная излучательная способность?

а) в 16 раз; б) в 4 раза; в) в 256 раз; г) на $1/4$.

3. Чёрное тело нагрели от 600 К до 1800 К. Во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость?

а) в 3 раза; б) в 9 раз; в) в 27 раз; г) в 81 раз.

4. Чёрное тело нагрели от $T_1=600$ К до $T_2=2400$ К. Как изменилась длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности (спектральной плотности энергетической светимости)?

а) $\Delta\lambda=\lambda_1-\lambda_2=2/3 \lambda_1$; б) $\Delta\lambda=\lambda_1-\lambda_2=1/3 \lambda_1$ в) $\lambda_2=3 \lambda_1$; г) $\lambda_1=2 \lambda_2$.

5. Укажите два правильно сформулированных положения, относящихся к равновесному излучению тел:

а) излучательной способностью тела называется физическая величина, численно равная энергии, излучаемой телом в единицу времени в узком диапазоне длин волн единичной ширины (монохроматическое излучение);

б) поглощательной способностью тела называется физическая величина, показывающая, какая доля монохроматического излучения, падающего на единицу площади тела в единицу времени, поглощается телом;

в) отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах, и равно излучательной способности чёрного тела при той же температуре;

г) энергетической светимостью тела называется физическая величина, численно равная полной энергии, излучаемой телом в широком диапазоне длин волн.

6. Укажите недостоверное определение одного из параметров, относящихся к радиационному теплообмену:

а) поток поверхностного излучения – это энергия, излучаемая поверхностью во всевозможных направлениях полупространства в единицу времени;

б) плотность потока поверхностного излучения равна потоку поверхностного излучения с единичной поверхности тела;

в) яркость излучения – физическая величина, численно равная плотности потока излучения в пределах единичного телесного угла;

г) степень черноты серого тела численно равна коэффициенту поглощения этого тела.

7. В каких единицах СИ измеряется спектральная плотность энергетической светимости?

а) $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; б) $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; в) $\text{Дж}/\text{с}$; г) $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

8. В каких единицах СИ измеряется энергетическая светимость?

а) $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; б) $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; в) $\text{Дж}/\text{с}$; г) $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

9. Участок поверхности тела с площадью ΔS за время Δt излучает во всех направлениях энергию ΔW . Как найти энергетическую светимость этого участка?

- а) $\varepsilon_T = \Delta W$;
- б) $\varepsilon_T = \Delta W / \Delta S \Delta t$;
- в) $\varepsilon_T = \Delta W \Delta t / \Delta S$;
- г) $\varepsilon_T = \Delta W \Delta S \Delta t$.

10. В эксперименте использовали три одинаковых по форме и размерам алюминиевых чайника. Поверхность одного из них была блестящей, у другого поверхность покрыта копотью, у третьего поверхность покрыта серой краской. Определялось время остывания чайников до температуры 40°C непосредственно после закипания. Какой чайник остывает быстрее?

а) блестящий; б) серый; в) закопченный; г) время остывания чайников одинаково.

11. На участок поверхности тела с поглощательной способностью A , находящегося в равновесии с излучением, падает поток энергии $\Phi_{\text{пад}}$. Укажите достоверную формулу, по которой можно рассчитать полный поток излучения $\Phi_{\text{пол}}$ с поверхности этого участка:

- а) $\Phi_{\text{пол}} = A \Phi_{\text{пад}}$;
- б) $\Phi_{\text{пол}} = (1 - A) \Phi_{\text{пад}}$;
- в) $\Phi_{\text{пол}} = \Phi_{\text{пад}}$;
- г) $\Phi_{\text{пол}} = (1 + A) \Phi_{\text{пад}}$.

12. Для серого тела, имеющего коэффициент отражения r и коэффициент прозрачности D , необходимо определить коэффициент поглощения. По какой формуле следует вести расчёт?

а) $A=1-(r+D)$;

б) $A=1-(r-D)$;

в) $A=1-(D-r)$;

г) $A=1+r+D$.

13. Плоская поверхность излучает как чёрное тело. Укажите достоверное утверждение о зависимости угловой плотности потока излучения (УППИ) от угла ψ между вектором нормали к поверхности и направлением излучения:

а) УППИ пропорционально величине $(1 - \cos \psi)$;

б) УППИ пропорционально $\cos \psi$;

в) УППИ пропорционально $\cos^2 \psi$;

г) УППИ пропорционально $\sin \psi$.

14. Укажите недостоверное положение, относящееся к радиационному теплообмену между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве:

а) элементарный угловой коэффициент излучения характеризует долю энергии излучения, падающей с элементарной площадки первого тела на элементарную площадку второго тела;

б) элементарная взаимная поверхность излучения характеризует долю элементарной площадки первого тела, полное излучение с которой эквивалентно энергии излучения с эле-

ментарной площадки первого тела на элементарную площадку второго тела;

в) средний угловой коэффициент излучения характеризует долю энергии излучения, падающей с поверхности первого тела на поверхность второго тела по отношению к полной энергии излучения с поверхности первого тела;

г) средняя взаимная поверхность - это доля поверхности первого тела, полное излучение с которой эквивалентно излучению с первого тела на второе.

15. На непрозрачное серое тело со степенью черноты ε падает поток излучения с плотностью $q_{\text{пад}}$. Плотность потока собственного излучения $q_{\text{соб}}$. Укажите формулу для расчёта плотности потока эффективного излучения данного тела:

а) $q_{\text{эфф}} = q_{\text{пад}} - \varepsilon q_{\text{пад}}$; б) $q_{\text{эфф}} = q_{\text{пад}} + \varepsilon q_{\text{пад}}$; в) $q_{\text{эфф}} = q_{\text{пад}} + q_{\text{соб}}$; г) $q_{\text{эфф}} = q_{\text{соб}} + (1-\varepsilon) q_{\text{пад}}$.

4. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Основные понятия и закономерности:

♦ явление теплопроводности, стационарная теплопроводность, температурное поле, температурное поле плоского слоя, тепловая проводимость и тепловое сопротивление плоского слоя, расчёт теплового потока через плоскую стенку;

♦ температурное поле многослойной стенки, тепловое сопротивление и эквивалентная теплопроводность многослойной стенки, расчёт тепловых потоков через многослойную плоскую стенку;

♦ теплопередача через плоскую стенку, коэффициент теплопередачи, расчёт температур поверхностей стенки.

♦ теплопроводность цилиндрической стенки, удельный тепловой поток, температурное поле и внутреннее термическое сопротивление цилиндрического слоя, расчёт удельного теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку, теплопередача через цилиндрическую стенку.

Задачи

1. Определить потери тепла через кирпичную стенку ($\lambda_k = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) площадью $3 \times 5 \text{ м}^2$ за сутки. Как изменится теплопроводность, если кирпичную стенку заменить деревянной (сосна поперек волокон, $\lambda_d = 0,107 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$)? Толщины стенок составляют $\delta_k = \delta_d = 25 \text{ см}$, температуры наружной и внутренней поверхностей стенки соответственно $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить стоимость потерь при цене $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ энергии 1 руб.

Ответ: 62,5 МДж; 22,2 МДж.

2. Определить плотность теплового потока и эквивалентную теплопроводность многослойной плоской стенки, состоящей из слоя окиси циркония толщиной $\delta_1 = 0,2 \text{ мм}$, слоя стали толщиной $\delta_2 = 6 \text{ мм}$ и слоя алюминия толщиной $\delta_3 = 10 \text{ мм}$, если температуры на внешних поверхностях стенки поддерживаются постоянными $t_1 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_4 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$;

коэффициенты теплопроводности: окиси циркония $\lambda_1=1,15$ Вт/(м·К), стали $\lambda_2=34,9$ Вт/(м·К) и алюминия $\lambda_3=204$ Вт/(м·К).

Ответ: 2,025 МВт/м², 41 Вт/(м·К).

3. Плоская стальная стенка с $\lambda_1=50$ Вт/(м·К) и толщиной $\delta_1=0,02$ м изолирована от тепловых потерь слоем асбестового картона с $\lambda_2=0,15$ Вт/(м·К) и $\delta_2=0,2$ м и слоем пробки с $\lambda_3=0,045$ Вт/(м·К) и толщиной $\delta_3=0,1$ м. Определить, какой толщины следует взять слой пенобетона с $\lambda=0,08$ Вт/(м·К) вместо асбеста и пробки, чтобы теплоизоляционные свойства стенки остались без изменения.

Ответ: 0,13 м.

4. Определить плотность теплового потока через плоскую стальную стенку котла толщиной $\delta_1=10$ мм с теплопроводностью $\lambda=50$ Вт/(м·К) для нагрева воды. В процессе эксплуатации поверхность нагрева со стороны газов покрылась слоем сажи толщиной $\delta_2=2$ мм с $\lambda_2=0,09$ Вт/(м·К). Температура газов $t_{c1}=1127$ °С, температура кипящей воды $t_{c2}=227$ °С, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1=100$ Вт/(м²·К) и от стенки к кипящей воде $\alpha_2=5000$ Вт/(м²·К). Вычислить температуры поверхностей стенки котла, а также определить, во сколько раз уменьшится теплопередача с появлением слоя сажи.

Ответ: 86,6 кВт/м²; 238 °С; 232,5 °С; 3,1 раза.

5. Как изменится плотность теплового потока и температуры поверхностей стенки, если в задаче 4 со стороны воды появится накипь толщиной $\delta_3=10$ мм с $\lambda_3=2,0$ Вт/(м·К)? Со стороны газа поверхность стенки чистая.

Ответ: в 1,5 раза.

6. Ребристая стенка толщиной $\delta=0,5$ см изготовлена из стали с коэффициентом теплопроводности $\lambda=54$ Вт/(м·К).

Коэффициенты теплоотдачи со стороны гладкой и оребренной поверхностей соответственно имеют значения $\alpha_1=1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $\alpha_2=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, коэффициент оребрения $S_2/S_1=2$. Увеличивается ли теплопередача через ребристую стенку и если увеличивается, то во сколько раз по сравнению с гладкой стенкой?

Ответ: примерно в 2 раза.

7. Трубопровод с внешним диаметром $d_2=15 \text{ мм}$ необходимо покрыть тепловой изоляцией. Целесообразно ли использовать в качестве изоляции асбест, коэффициент теплопроводности которого $\lambda=0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляции в окружающую среду $\alpha_2=8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

8. Электрический нагреватель выполнен из нихромовой проволоки диаметром $d=2 \text{ мм}$ и длиной $l=10 \text{ м}$. Он обдувается холодным воздухом с температурой $t_c=20 \text{ }^\circ\text{С}$. Вычислить тепловой поток с 1м нагревателя, а также температуру на поверхности проволоки t_n , если сила тока, проходящего через нагреватель, составляет 25 А. Удельное электрическое сопротивление нихрома $\rho=1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$; коэффициент теплопроводности нихрома $\lambda=17,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху $\alpha=46,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Ответ: 218,5 Вт/м, 769 $^\circ\text{С}$.

9. Обмуровка топки парового котла состоит из двух слоев. Внутренний слой выполнен из шамотного кирпича: $\delta_1=400 \text{ мм}$, $\lambda_1=1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а наружный - из красного кирпича: $\delta_2=200 \text{ мм}$, $\lambda_2=0,58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Температуры внутренней и наружной поверхности обмуровки соответственно $t_1=900 \text{ }^\circ\text{С}$ и $t_3=90 \text{ }^\circ\text{С}$.

Определить потери тепла q через обмуровку и наибольшую температуру t_2 красного кирпича.

Ответ: 1292 Вт; 530 °С.

10. Определить потерю тепла Q [Вт] через стенку из красного кирпича [$\lambda = 0,8$ Вт/(м·К)] длиной $l=5$ м, высотой $h=4$ м и толщиной $\delta=510$ мм, если температура воздуха внутри помещения $t_{\text{вн}}=18$ °С, коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки $\alpha_1 = 7,5$ Вт/(м·К), температура наружного воздуха $t_{\text{н}}=30$ °С, коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки $\alpha_2=20$ Вт/(м·К). Вычислить также температуры на поверхностях стены $t_{\text{н1}}$ и $t_{\text{н2}}$

Ответ: 1170 Вт; 10,4 °С; -27,1 °С.

11. Определить расход тепла q_L через стенку трубы ($d_1/d_2=20/30$ мм) из жаропрочной стали, коэффициент теплопроводности которой $\lambda=17,4$ Вт/(м·К), а температуры внешней и внутренней поверхностей $t_1=600$ °С, $t_2=450$ °С.

Ответ: 40,75 кВт/м.

12. Вычислить потерю тепла с 1 м неизолированного трубопровода диаметром $d_1/d_2 = 300/330$ мм, проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой $t_{\text{вн}}=90$ °С. Температура окружающего воздуха $t_{\text{н}}=-15$ °С. Коэффициент теплопроводности материала трубы $\lambda=50$ Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $\alpha_1=1000$ Вт/(м·К) и от трубы к окружающему воздуху $\alpha_2=12$ Вт/(м·К). Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

Ответ: 652 Вт/м; 89,8 °С; 89,6 °С.

13. Стена наружного ограждения помещения толщиной $\delta=0,51$ м выполнена из красного кирпича с коэффициентом теплопроводности кладки $\lambda=0,69$ Вт/(м·К), Температура воздуха

в помещении $t_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура внутренней поверхности стены $t_1^{\text{ст}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить температуру поверхности стены с наружной стороны и суточные потери тепла в кВт·ч через указанное ограждение площадью 100 м^2 . Расчетный коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны $\alpha_1 = 10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

14. Определить суточную потерю тепла в кВт·час через плоскую двухслойную стенку рабочей камеры печи площадью 10 м^2 , если температура внутренней поверхности $t_1^{\text{ст}} = 760\text{ }^{\circ}\text{C}$, наружной $t_3^{\text{ст}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Первый слой толщиной $\delta = 0,25\text{ м}$ выполнен из шамотного кирпича, а второй такой же толщины - из диатомитового кирпича. Зависимости коэффициента теплопроводности материалов от температуры в $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ определяются формулами: для первого слоя $\lambda_1 = 0,842 + 0,0006t$; для второго слоя $\lambda_2 = 0,1124 + 0,00024t$. Представить график распределения температуры по толщине стенки.

15. Определить толщину слоя изоляции паропровода наружным диаметром $d_2 = 50\text{ мм}$, если при температуре поверхности $t_2^{\text{ст}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ наружная поверхность изоляции имеет температуру $t_3^{\text{сн}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_2 = 0,15\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$. Температура окружающего воздуха $t_{\text{в}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от наружной изоляции к окружающей среде $\alpha_2 = 10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

16. Вычислить плотность теплового потока q через стенку холодильника, состоящую из наружного слоя строительного кирпича, толщиной $\delta_1 = 380\text{ мм}$ и внутреннего слоя сухой пробки толщиной $\delta_2 = 240\text{ мм}$. Температура наружной поверхности пробкового слоя $t_3^{\text{ст}} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, наружной поверхности кирпичного слоя $t_1^{\text{ст}} = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Представить в масштабе график изменения температуры в стенке холодильника. Коэффициент теплопроводности для кирпича принять равным $0,8\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$, а для пробки $0,07\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$.

17. Паропровод наружным диаметром $d_1=35$ см покрыт двумя слоями тепловой изоляции имеющими толщину по $\delta=7$ см каждый. Внутренний слой изоляции выполнен на магнезии с коэффициентом теплопроводности $0,07$ Вт/(м·К), внешний слой - из глиняно-асбестовой массы с коэффициентом теплопроводности $0,31$ Вт/(м·К). Внутренняя поверхность изоляции паропровода имеет температуру $t_1^{ст}=550$ °С, внешняя $t_3^{ст}=55$ °С. Вычислить потерю тепла паропроводом на 1 м его длины, а также температуру $t_2^{ст}$ поверхности соприкосновения обоих слоев. Каковы будут потери, если слои изоляции поменять местами?

18. Паропровод покрыт двумя слоями тепловой изоляции, имеющими одинаковую толщину. Средний диаметр второго слоя в два раза больше среднего диаметра первого слоя, а коэффициент теплопроводности второго слоя в ε раз меньше коэффициента теплопроводности первого. На сколько процентов изменится потеря тепла на 1 пог. м паропровода, если слои изоляции поменять местами, сохранив все прочив условия без изменения? (Для решения задачи можно воспользоваться приближенной формулой для q_l , Вт/пог.м).

19. Паропровод наружным диаметром $d_1=200$ мм, имеющий температуру наружной стенки $t_1^{ст}=320$ °С, покрыт слоем асбестовой изоляции толщиной 100 мм. Коэффициент теплопроводности изоляции λ , Вт/(м·К) связан с температурой зависимостью $\lambda=0,087+0,00023t$. Определить потери тепла паропроводом длиной 50 м при температуре наружной поверхности изоляции 40 °С.

20. Определить, при какой минимальной толщине деревянной стены с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,11$ Вт/(м·К) на ее внутренней поверхности не будет выпадать роса, если расчетная температура наружного воздуха $t_n=-18$ °С температура воздуха с внутренней стороны $t_b=18$ °С, точка ро-

сы $t_p=14$ °С. Коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны $\alpha_1=9$ Вт/(м²·К), с наружной $\alpha_2=20$ Вт/(м²·К).

21. Температура поверхности трубки паропровода наружным диаметром $d_1=350$ мм равна $t_1^{ст}=500$ °С. Какой будет температура наружной поверхности изоляции $t_2^{ст}$, имеющей коэффициент теплопроводности $\lambda=0,06$ Вт/(м·К), если ею накрыт паропровод слоем толщиной $\delta=80$ мм? Температура окружающего воздуха $t_2=20$ °С. Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде $\alpha_2=16$ Вт/(м²·К). Определить также потери тепла на 1 м паропровода.

22. Стенка холодильника, состоящая из наружного слоя изоляционного кирпича толщиной $\delta_1=250$ мм и внутреннего слоя совелита толщиной $\delta_2=100$ мм, имеет температуру наружной $t_1^{ст}=21$ °С и внутренней $t_3^{ст}=0$ °С поверхностей. Коэффициенты теплопроводности материала слоев соответственно равны: $\lambda_1=0,24$ Вт/(м·К); $\lambda_2=0,09$ Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока через стенку и температурные градиенты в отдельных слоях. Представить графически распределение температуры по толщине стенки.

23. Изобразите график распределения температуры в плоской однослойной стенке и в пограничных слоях горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку при стационарном тепловом режиме, отразив следующее соотношение термических сопротивлений теплоотдачи и теплопроводности по формуле (1):

$$\frac{1}{\alpha_1} : \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} : \frac{1}{\alpha_2} = 3 : 2 : 1. \quad (1)$$

24. Изобразите графически характер распределения температуры по толщине плоской трехслойной стенки для стационарного теплового режима при следующих соотношениях между коэффициентами теплопроводности каждого слоя по формуле (2)

$$\begin{aligned}\lambda_1 &> \lambda_2 > \lambda_3; \\ \lambda_1 &< \lambda_2 = \lambda_3.\end{aligned}\tag{2}$$

25. Определить коэффициент теплопроводности кирпичной стенки толщиной $\delta=390$ мм, если температура на внутренней поверхности стенки $t_1=300$ °С и на наружной $t_2=60$ °С. Потери тепла через стенку $q=178$ Вт/м².

26. Через плоскую металлическую стенку топки котла толщиной $\delta=14$ мм от газов к кипящей воде проходит удельный тепловой поток $q=25000$ Вт/м². Коэффициент теплопроводности стали $\lambda=50$ Вт/(м·К). Определить перепад температур на поверхностях стенки.

27. Определить удельный тепловой поток через бетонную стенку толщиной $\delta=300$ мм, если температуры на внутренней и наружных поверхностях стенки соответственно равны $t_1=15$ °С и $t_2=15$ °С. Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda=1,0$ Вт/(м·К).

28. Определить потерю тепла q через свод пламенной печи, выложенной из шамотного кирпича [$\delta=250$ мм, $\lambda=1,28$ Вт/(м·К)]. Температура свода печи на горячей стороне $t_1=1000$ °С, а на холодной $t_2=200$ °С.

29. Определить расход тепла Q [Вт] через кирпичную стенку толщиной $\delta=250$ мм на площади 3×5 м², если температуры поверхностей стенки $t_1=10$ °С и $t_2=20$ °С, а коэффициент теплопроводности кирпича $\lambda=1,16$ Вт/(м·К).

30. Вычислить плотность теплового потока q через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена: а) из стали $\lambda_{ст}=40$ Вт/(м·К); б) из бетона $\lambda_б=1,1$ Вт/(м·К); в) из диатомитового кирпича $\lambda_к=0,11$ Вт/(м·К). Во всех случаях толщина стенки $\delta = 50$ мм. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равными $t_1=100$ °С и $t_2=90$ °С.

31. Стенка нагревательной печи имеет два слоя кирпича. Внутренний слой выполнен из огнеупорного кирпича толщиной $\delta_1=350$ мм, а наружный из красного кирпича толщиной $\delta_2=250$ мм. Определить температуру на внутренней поверхности стенки t_1 и на внутренней стороне красного кирпича t_2 , если на наружной стороне температура стенки $t_3=90$ °С, а потеря тепла через 1 м² поверхности стенки равна 1 кВт. Коэффициенты теплопроводности огнеупорного и красного кирпича соответственно равны: $\lambda_{ок}=1,4$ Вт/(м·К) и $\lambda_{кк}=0,58$ Вт/(м·К).

32. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпича и диатомитовой засыпки между ними. Диатомитовая засыпка имеет толщину $\delta_2=50$ мм и $\lambda_2=0,14$ Вт/(м·К), а красный кирпич имеет $\delta_3=250$ мм и $\lambda_3=0,7$ Вт/(м·К). Во сколько раз необходимо увеличить толщину красного кирпича для того, чтобы обмуровка печи без диатомитовой засыпки имела такое же внутреннее термическое сопротивление, как и с засыпкой.

33. Определить поток тепла q через поверхность стальной стенки котла [$\delta_1=20$ мм, $\lambda_1=58$ Вт/(м·К)], покрытую слоем накипи [$\delta_2=2$ мм, $\lambda_2=1,16$ Вт/(м·К)]. Наибольшая температура поверхности стенки равна 250 °С, а наименьшая

температура накипи $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить также наибольшую температуру накипи.

34. Вычислить тепловой поток через 1 м^2 чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхностях стенки, если заданы следующие величины: температура дымовых газов $t_{\text{ср1}}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипящей воды $t_{\text{ср2}}=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1=100\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и от стенки к кипящей воде $\alpha_2=5000\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda=50\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и толщина стенки $\delta=12\text{ мм}$.

35. Решить задачу 34 при условии, что в процессе эксплуатации поверхность нагрева парового котла со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной $\delta_{\text{с}}=1\text{ мм}$ [$\lambda_{\text{с}}=0,08\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], а со стороны воды - слоем накипи толщиной $\delta_{\text{н}}=2\text{ мм}$ [$\lambda_{\text{н}}=0,8\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$]. Вычислить тепловой поток через 1 м^2 загрязненной поверхности нагрева и температуры на поверхностях соответствующих слоев $t_{\text{п1}}$, $t_{\text{п2}}$, $t_{\text{п3}}$ и $t_{\text{п4}}$. Сравнить результаты расчета с ответом задачи 34 и определить уменьшение тепловой нагрузки Δq (в %).

36. Определить плотность теплового потока q [Вт/м^2] через кирпичную стенку толщиной 510 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{к}}=0,8\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, покрытую снаружи слоем теплоизоляции толщиной 50 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{из}}=0,08\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Температура воздуха внутри помещения $t_{\text{ср1}}=18\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки $\alpha_1=7,5\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, температура наружного воздуха, $t_{\text{ср2}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности $\alpha_2=20\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Вычислить также температуры на поверхностях стены $t_{\text{п1}}$, $t_{\text{п2}}$ и на поверхности слоя $t_{\text{п3}}$.

37. Змеевики пароподогревателя выполнены из труб жароупорной стали диаметром $d_1/d_2=32/42$ мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda=14$ Вт/(м·К). Температура внешней поверхности трубы $t_2=580$ °С и внутренней поверхности $t_1=450$ °С. Вычислить удельный тепловой поток через стенку на единицу длины трубы $q_{\text{л}}$.

38. Железобетонная дымовая труба [$d_2/d=800/1300$ мм, $\lambda_2=1,10$ Вт/(м·К)] покрыта с внутренней стороны слоем огнеупорной футеровки $\lambda_1=0,5$ Вт/(м·К). Определить толщину футеровки δ_1 и температуру наружной поверхности трубы t_3 при условии, чтобы потери тепла не превышали $q_{\text{л}}=2000$ Вт/м, а наибольшие температуры футеровки и бетона не превышали $t_1=421$ °С и $t_2=200$ °С.

39. Стальной паропровод [$d=100$ мм, $d=110$ мм, $\lambda_1=58$ Вт/(м·К), $t_1=250$ °С] покрыт двумя слоями тепловой изоляции одинаковой толщины [$\delta=50$ мм, $\lambda_2=0,07$ Вт/(м·К), $\lambda_3=0,14$ Вт/(м·К)]. Определить потери тепла $q_{\text{л}}$ [Вт/м] и температуру t_3 на границе соприкосновения этих слоев. Повторить эти расчеты при условии, что изоляция первого слоя установлена на место второго. Температура t_4 на внешней поверхности в обоих случаях одинакова и равна 50 °С.

40. Определить температуру на границах слоев трехслойной изоляции трубы. Внутренний диаметр трубы $d=245$ мм. Толщина слоев и коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов соответственно равны: $\delta_1=100$ мм, $\delta_2=20$ мм, $\delta_3=30$ мм, $\lambda_1=0,03$ Вт/(м·К), $\lambda_2=0,06$ Вт/(м·К) и $\lambda_3=0,12$ Вт/(м·К). Температура внутренней поверхности трубопровода 250 °С, а наружной поверхности изоляции 65 °С.

41. Определить тепловой поток через поверхность 1 м паропровода внутренним диаметром 140 мм, изолированного двумя слоями тепловой изоляции толщиной $\delta_2=20$ мм и $\delta_3=40$ мм. Коэффициенты теплопроводности трубы и изоляции соответственно равны $\lambda_1=55$ Вт/(м·К), $\lambda_2=0,037$ Вт/(м·К) и $\lambda_3=0,14$ Вт/(м·К). Температура на внутренней поверхности трубопровода $t_1=300$ °С, а на наружной поверхности изоляции $t_4=55$ С. Толщина стенки паропровода $\delta_1=5$ мм. Как изменится потеря тепла через изолированную стенку, если изоляционные слои поменять местами?

42. Трубопровод диаметром $d_1/d_2=44/51$ мм, по которому течет масло, покрыт слоем бетона толщиной $\delta_2=80$ мм. Коэффициент теплопроводности материала трубопровода $\lambda_1=50$ Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности бетона $\lambda_2=1,28$ Вт/(м·К). Средняя температура масла на рассматриваемом участке трубопровода $t_{cp1}=120$ °С, температура окружающего воздуха $t_{cp2}=20$ °С. Коэффициенты теплоотдачи от масла к стенке $\alpha_1=100$ Вт/(м·К) и от поверхности бетона к воздуху $\alpha_2=10$ Вт/(м²·К). Определить потери тепла с 1 м трубопровода, покрытого бетоном.

43. Плоский алюминиевый лист толщиной 0,8 мм пластинчатого теплообменника омывается с одной стороны газом, с другой - воздухом, средние температуры которых $t_{cp1}=280$ °С и $t_{cp2}=210$ °С, а коэффициенты теплоотдачи соответственно $\alpha_1=81,5$ Вт/(м·К) и $\alpha_2=232,6$ Вт/(м²·К). Коэффициент теплопроводности стенки $\lambda=203,5$ Вт/(м·К). Определить удельный тепловой поток, переданный через стенку.

44. Оценить тепловые потери с 1,0 м трубопровода диаметром $d_1/d_2=150/165$ мм, покрытого слоем изоляции

толщиной $\delta_1 = 60$ мм, если трубопровод проложен на воздухе с $t_{\text{ср}2} = 15$ °С и по нему течет вода со средней температурой $t_{\text{ср}1} = 90$ °С. Коэффициенты теплопроводности материала трубы и изоляции соответственно равны $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,15$ Вт/(м·К), а коэффициенты теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2 = 8$ Вт/(м·К), а от воды к стенке трубы $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м·К). Вычислить также температуру на внешней поверхности трубы и внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2 = 8$ Вт/(м·К), а от воды к стенке трубы $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м·К). Вычислить также температуру на внешней поверхности трубы и внешней поверхности изоляции.

Тесты по разделу «Стационарная теплопроводность»

1. Укажите одно неверное утверждение, относящееся к теплопроводности плоской стенки толщиной δ и имеющей удельную теплопроводность λ при температурах на её горячей и холодной сторонах t_1 и t_2 :

а) стационарный процесс теплопроводности описывается дифференциальным уравнением $d^2t/dx^2 = 0$;

б) плотность потока тепла, переносимого через стенку, описывается уравнением $q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}$;

в) плотность потока тепла, переносимого через стенку, описывается уравнением $q = \frac{t_1 - t_2}{\lambda / \delta}$;

г) плотность потока тепла, переносимого через стенку, описывается уравнением

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\delta / \lambda}.$$

2. Укажите одно правильное утверждение, относящееся к стационарной теплопроводности через плоскую стенку толщиной δ и удельной теплопроводностью λ при температурах её горячей t_1 и холодной t_2 сторон:

а) граничное условие для данной задачи записывается:

плотность потока тепла $q = \text{const}$.

б) граничное условие для данной задачи записывается:

$t(x=0) = t_1$, $t(x=\delta) = t_2$;

в) распределение температур в стенке описывается уравнением $t = (t_1 - t_2) x / \delta$;

г) термическое сопротивление стенки определяется выражением $R_T = \lambda / \delta$.

3. При стационарном процессе теплопроводности в многослойной стенке, состоящей из двух плоских слоёв толщиной δ_1 и δ_2 , имеющих теплопроводности λ_1 и λ_2 и температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки t_1 и t_2 , можно сформулировать следующие положения (указать одно неправильное):

а) плотность теплового потока через стенку не зависит от времени;

б) плотность теплового потока через стенку зависит только от теплопроводности слоёв;

г) плотность теплового потока через стенку определяется выражением

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}};$$

д) эквивалентная теплопроводность стенки определяется выражением

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}.$$

4. Для стационарной теплопроводности в многослойной стенке можно сформулировать следующие положения (указать одно неправильное):

а) температурное поле в стенке не зависит от времени и определяется только одной координатой $t(x)$;

б) зависимость $t(x)$ является линейной;

в) угловые коэффициенты прямых $t(x)$ в отдельных слоях различны и обратно пропорциональны их удельной теплопроводности;

г) плотность теплового потока в слоях различна и пропорциональна их термическому сопротивлению.

5. Для стационарного процесса теплопередачи от горячего теплоносителя (t_1) к холодному (t_2) через двухслойную плоскую стенку (толщины слоёв δ_1 и δ_2 , удельные теплопроводности λ_1 и λ_2) при коэффициентах теплоотдачи на горячей и холодной сторонах стенки α_1 и α_2 можно сформулировать следующие положения (указать одно неправильное):

а) плотность теплового потока обратно пропорциональна полному термическому сопротивлению стенки;

б) тепловой поток через стенку пропорционален времени процесса и площади стенки;

в) полное термическое сопротивление стенки равно сумме внешних и внутренних сопротивлений;

г) внешнее сопротивление стенки определяется толщиной слоёв, контактирующих с теплоносителями.

6. Для стационарного процесса теплопередачи от горячего теплоносителя (t_1) к холодному (t_2) через двухслойную плоскую стенку (толщины слоёв δ_1 и δ_2 , удельные теплопроводности λ_1 и λ_2) при коэффициентах теплоотдачи на горячей и холодной сторонах стенки α_1 и α_2 можно сформулировать следующие положения (указать одно неправильное):

а) коэффициент теплопередачи характеризует плотность передаваемого теплового потока при единичной разности температур между теплоносителями;

б) коэффициент теплопередачи характеризует плотность передаваемого теплового потока при единичной разности температур между стенками;

в) плотность теплового потока пропорциональна разности температур $t_1 - t_2$;

г) внутреннее термическое сопротивление стенки определяется выражением $\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2$.

7. В стационарном процессе теплопередачи между горячим и холодным теплоносителями через плоскую стенку толщиной δ и теплопроводностью λ передаётся тепловой поток с плотностью q . Температуры теплоносителей и коэффициенты

теплоотдачи на сторонах стенки соответственно равны t_{c1} и t_{c2} , α_1 и α_2 . Для этих условий температура на горячей стороне стенки:

а) $t_1 < t_{c1}$;

б) $t_1 = t_{c1}$;

в) $t_1 < t_{c2}$;

г) $t_1 = t_{c1} - q/\lambda$.

8. Для стационарного процесса теплопроводности через цилиндрическую стенку:

а) плотность теплового потока пропорциональна радиусу стенки;

б) плотность теплового потока обратно пропорциональна радиусу стенки;

в) удельный тепловой поток не зависит от радиуса стенки;

г) удельный тепловой поток измеряется в Вт/м.

9. Для стационарного процесса теплопроводности через цилиндрическую стенку, внутренний и внешний радиусы которой равны r_1 и r_2 , а температуры t_1 и t_2 , для распределения температур в стенке можно утверждать (укажите неверное утверждение):

а) температура пропорциональна отношению r_2/r_1 ;

б) распределение температур имеет нелинейный характер;

в) распределение температур определяется выражением

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \ln(r/r_1) / \ln(r_2/r_1);$$

г) градиент температуры в стенке определяется выражением $\frac{dt}{dr} = - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r}$.

10. Для стационарного процесса теплопередачи между горячим и холодным теплоносителями через цилиндрическую стенку можно утверждать (укажите неверное утверждение):

а) удельный тепловой поток пропорционален коэффициенту теплопередачи;

б) коэффициент теплопередачи обратно пропорционален полному термическому сопротивлению стенки;

в) полное термическое сопротивление стенки пропорционально её толщине;

г) внешнее термическое сопротивление стенки при прочих равных условиях тем больше, чем больше её радиус.

5. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Основные понятия и закономерности:

- ♦ подобные явления (процессы), уравнения подобия, условия существования подобия;

- ♦ критерии подобия и их физический смысл, критерии Рейнольдса, Пекле, Био и Нуссельт;

- ♦ критерии Фруда, Эйлера, Архимеда, Грасгофа, Фруда;

- ♦ гидродинамическое подобие, подобие температурных полей в твердых телах.

Задачи

1. Сопротивление сложного участка трубопровода диаметром $d=200$ мм, по которому протекает окись углерода при $t=327$ °C и $p=1$ атм ($v_m=5,206 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho_n=0,5685 \text{ кг/м}^3$), решено определить на модели, изготовленной в $1/4$ натуральной величины, путем продувания воздуха при $t=20$ °C и $p=1,0$ атм ($v_m=1,511 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho_m=1,2045 \text{ кг/м}^3$).

Определить:

а) с какой средней скоростью U_m следует вести продувку на модели, если средняя скорость потока окиси углерода в трубе составляет $u_n=10$ м/с.

б) какова будет потеря напора на исследуемом участке трубопровода при указанной скорости, если на модели при требуемой для нее скорости потеря напора оказалась равной $\Delta p=1,20$ м вод. ст.

2. Необходимо методом моделирования исследовать распределение температур в длинном стальном валу ($d_n=2R_{0n}=400$ мм) через $\tau_n=2$ ч после загрузки его в печь. Для стального вала $\lambda_n=38$ Вт/(м·K), $a_n=9,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала в печи $\alpha_n=110$ Вт/(м²·K). Модель вала выполнена из легированной стали, для которой $\lambda_m=14,5$ Вт/(м·K), $a_m=4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи к

модели вала в лабораторной печи $\alpha_m=150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Определить диаметр d_m модели вала и интервал времени τ_m , через который необходимо начать измерение поля температур в модели.

3. Определить диаметр модели вала d_m и необходимое значение коэффициента теплоотдачи α_m , при которых температурное поле в модели вала станет подобным температурному полю в образце в условиях задачи 2 через $\tau_m=10$ мин после загрузки его в печь. Определить также соотношение между значениями температур для сходственных точек образца и модели, если известно, что их температуры при загрузке были одинаковы и равны $t_{0H}=t_{0M}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температуры сред в печах составляли $t_{cp,H}=1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{cp,M}=200 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. По трубе диаметром $d_1=300$ мм протекает воздух со средней скоростью $v_1=4$ м/с при $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p=1$ атм, ($v_1=1,511\cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$). Определить, какая скорость v_2 должна быть задана для воды при $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($v_2=1,0\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) в трубе диаметром $d_2=100$ мм, чтобы потоки в обеих трубах были гидродинамически подобными.

Ответ: 0,2 м/с

5. Для измерения расхода природного газа в газопроводе диаметром $d_H=400$ мм предполагается установить диафрагму, характеристики которой определялись на модели, изготовленной в $1/4$ натуральной величины. В модели протекала вода при $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Опыты показали, что при расходе воды $Q_M \geq 39,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ на модели устанавливается режим автомодельной турбулентности. Определить соответствующий этому режиму минимальный расход природного газа в натуре Q_m . Температура и давление природного газа $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=1,0$ атм ($\rho_H=0,72 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\mu_H=1,09\cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$). Для воды при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_M=1,0\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Указание. Для режима автомодельной турбулентности $Eu \text{ const}$.

Ответ: $1713 \text{ м}^3/\text{ч}$

6. Пользуясь условиями предыдущей задачи, определить каким должен быть перепад пьезометрических высот на диафрагме в газопроводе Δh_H при расходе природного газа $Q_H=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, если на модели при расходе воды $Q_M=100 \text{ м}^3/\text{ч}$ он оказался равным $\Delta h_M=136,0 \text{ мм рт. ст.}$ Указание. При заданных расходах Q_H и Q_M оба потока находятся в автомодельной области.

Ответ: 419 мм

7. Исследование сопротивления элемента воздушного подогревателя выполнено на водяной модели, изготовленной в 1/5 натуральной величины. Средняя скорость и температура воздуха, протекающего в образце, равны соответственно $v_H=5 \text{ м/с}$, $t_H=100 \text{ }^\circ\text{C}$. Физические параметры воздуха при этой температуре $\rho_H=0,972 \text{ кг/м}^3$, $\nu_H=23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В модели протекала вода при температуре $t_M=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_M=998,2 \text{ кг/м}^3$, $\nu_M=1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Сопротивление модели оказалось равным $\Delta p_M = 200 \text{ мм вод. ст.}$ Определить среднюю скорость воды v_M , которую следовало задать на модели, и сопротивление элемента воздушного подогревателя Δp_H .

Ответ: 4,1 мм

8. Стальной слиток в форме куба с длиной ребра $l_H=0,5 \text{ м}$, начальная температура которого $t_{0H}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, помещен для нагрева в печь с температурой $t_{ср,н}=800 \text{ }^\circ\text{C}$. Исследование распределений температур в слитке в процессе нагрева проводится на модели, выполненной из титана. Начальная температура титанового слитка $t_{0M}=20 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура лабораторной печи $t_{ср,м}=300 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоотдачи для слитков соответственно равны:

Стального: $\lambda_H=65,8 \text{ Вт/(мК)}$, $a_H=21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\alpha_H=120 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Титанового: $\lambda_M=15,1 \text{ Вт/(мК)}$, $a_M=6,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\alpha_M=100 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$.

Определить характеристический размер титанового слитка (длину ребра l м) и интервал времени t_m , через который необходимо начать измерение поля температур в модели, если желательно выяснить, каково распределение температур в стальном слитке через $\tau_n=1$ ч после его загрузки в печь. Определить также соотношение между температурами в сходственных точках образца и модели.

9. По условиям предыдущей задачи определить, какими должны быть характеристический размер модели слитка l м и коэффициент теплоотдачи α_m , чтобы температурное поле в модели слитка стало подобным температурному полю в образце через $\tau_m = 5$ мин после загрузки модели в печь.

10. Стальной шар диаметром $d_H=2R_{0H}=0,2$ м, нагретый до температуры $t_{0H}=900$ °С, погружен в масляную ванну, имеющую температуру $t_{CP,H}=100$ °С. Исследование температурного поля в шаре проводится на модели, выполненной из бетона, нагретой до температуры $t_{0M}=100$ °С и охлаждаемой в потоке воздуха, температура которого $t_{CP,M}=20$ °С. Коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоотдачи для шара соответственно равны:

Стального: $\lambda_H=57,0$ Вт/(м·К), $a_H=15 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\alpha_H=600$ Вт/(м²·К).

Бетонного: $\lambda_M=1,275$ Вт/(м·К), $a_M=5 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha_M=10$ Вт/(м²·К).

Определить диаметр модели d_m , интервал времени, через который температурное поле в модели будет подобно температурному полю в образце через $\tau_n=3$ мин после начала охлаждения, и соотношение между температурами для образца и модели в сходственных точках.

11. Необходимо изучить движение воздуха в трубе теплообменника, внутренний диаметр которой $d_1=1,5$ м, при скорости потока воздуха $v_1=4$ м/с. Для этого взята модель трубы

$d=0,15$ м. Какую скорость воздуха v_2 нужно создать в модели, чтобы осуществить в ней гидродинамическое подобие процесса?

Ответ: 40 м/с

12. Гладкая плита шириной $b=1$ м и длиной $l=1,2$ м обдувается сухим воздухом со скоростью $w_0=6$ м/с. Найти коэффициент теплоотдачи α и тепловой поток Q , если температура стенки $t_{ст}=80$ °С и средняя температура жидкости $t_{ж}=20$ °С?

Ответ: 24,2 Вт/м²·К

13. По трубе внутренним диаметром $d=50$ мм и длиной $l=3$ м протекает вода со скоростью $v_0=0,8$ м/с. Найти коэффициент теплоотдачи α , если средняя температура воды $t_{ж}=50$ °С, а температура стенки $t_{ст}=70$ °С?

14. По трубке диаметром $d=16$ мм и длиной $l=2,1$ м течёт горячая вода, отдающая теплоту через стенку среде, омывающей трубку снаружи. Расход воды через трубку $G=0,0091$ кг/с, температура воды на входе $t_1=87,2$ °С, на выходе $t_2=29$ °С, средняя температура стенки трубки $t_c=15,3$ °С. Вычислить значения критериев Nu , Re и Pe , приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости. Коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой.

15. Вычислить коэффициент теплоотдачи и число Nu для условий задачи 14, если коэффициент теплоотдачи отнести к средней логарифмической разности температур между жидкостью и стенкой. Сравнить полученные значения с результатом задачи 14.

16. Вычислить число Эйлера и коэффициент сопротивления трения для условий задачи 14, если перепад давления по длине трубки $\Delta p=5,88$ Па.

Тесты по разделу «Теория подобия»

1. Какой критерий подобия характеризует соотношение инерционных сил и сил вязкости при движении жидкости:

- а) число Фурье;
- б) число Рейнольдса;
- в) число Эйлера;
- г) число Галилея.

2. Какой критерий подобия характеризует теплоотдачу на границе твёрдая стенка – жидкость:

- а) число Пекле;
- б) число Прандтля;
- в) число Нуссельта;
- г) число Фруда.

3. Какой критерий подобия характеризует относительную интенсивность диффузионного и конвективного механизмов переноса тепла:

- а) число Фурье;
- б) число Пекле;
- в) число Грасгофа;
- г) число Архимеда.

4. С помощью какого критерия подобия можно определить характерное время диффузионного переноса тепла:

- а) Pr ;
- б) Eu ;
- в) Fo ;
- г) Ho .

5. Какой критерий подобия позволяет определить соотношение сил тяжести и инерционных сил в конвективном теплопереносе:

- а) Fr ;
- б) Eu ;
- в) Gr ;
- г) Ga .

6. Какой критерий подобия позволяет определить соотношение сил тяжести и вязкого трения в конвективном теплопереносе:

- а) Re ;
- б) Eu ;
- в) Pe ;
- г) Ga .

7. Какой критерий подобия позволяет определить соотношение перепада давления и динамического напора в конвективном теплопереносе:

- а) Re ;
- б) Eu ;

в) Pe ;

г) Gr .

8. Какой критерий подобия характеризует соотношение толщин гидродинамического и температурного пограничных слоёв:

а) Re ;

б) Pr ;

в) Pe ;

г) Fr .

6. КОНВЕКЦИЯ

Основные понятия и закономерности:

- ◆ конвективный теплообмен, свободная и вынужденная конвекция, влияние режима течения теплоносителя, закон Ньютона-Рихмана, коэффициент теплоотдачи;

- ◆ основные параметры конвективного теплообмена: определяющий размер, эквивалентный диаметр каналов, средняя температура и средняя скорость течения теплоносителя, влияние начального участка труб;

- ◆ критерии подобия, обобщённое уравнение конвективного теплообмена;

- ◆ уравнения подобия для расчета коэффициента теплоотдачи в различных задачах конвективного теплообмена.

Задачи

1. Плоская пластина длиной $l=2$ м и шириной $b=1,0$ м, имеющая температуру $t_c=50$ °С, омывается с обеих сторон продольным потоком воздуха, скорость и температура которого соответственно равны $v=3$ м/с и $t_{ж}=10$ °С. Физические параметры воздуха при этой температуре: $\nu=14,16 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda=2,51 \cdot 10^{-2}$ Вт/(мК) и $\alpha=20,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Определить средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ср}$ и количество тепла Q , отдаваемое пластиной потоку воздуха за 1с.

2. Температура поверхности вертикальной стенки высотой 3 м равна 10 С. Температура воздуха в помещении 20 °С. Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке.

3. Отопление помещения производится горизонтальным трубопроводом с наружным диаметром 25 мм, обогреваемым конденсирующимся паром. Температура наружной поверхности трубопровода $t_c=104$ °С, температура в

помещении $t_{\text{ж}}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить необходимую длину трубопровода, если расчетная мощность отопительной системы 1,5 кВт.

4. Определить коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней стенке трубы диаметром 17 мм, если температура стенки $t_{\text{с}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура воды в трубе $t_{\text{ж}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость воды в трубе $u = 0,5\text{ м/с}$.

5. Плоская пластина длиной $l=1,5\text{ м}$ и шириной $b=0,8\text{ м}$ обтекается с обеих сторон продольным потоком воздуха, скорость и температура которого соответственно равны $v=4\text{ м/с}$, $t_{\text{ж}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности пластины $t_{\text{с}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить количество тепла Q , отдаваемое пластиной воздуху. Физические параметры воздуха при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\nu=15,06\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda=2,59\cdot 10^{-2}\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $\alpha=21,4\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$.

6. Как изменится для условий задачи 5 количество тепла, отдаваемое пластиной, если обтекающий ее поток воздуха направить вдоль ширины пластины ?

7. Во сколько раз увеличится количество тепла Q , отдаваемое пластиной воздуху, если, сохранив неизменными условия задачи 5, установить впереди пластины турбулизирующую решетку, под влиянием которой ламинарный режим течения в пограничном слое перейдет в турбулентный ?

8. Плоская пластина длиной $l=1,2\text{ м}$ обтекается продольным потоком воздуха со скоростью $v=2\text{ м/с}$. Температура воздуха $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности $t_{\text{с}}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Физические параметры воздуха при этой температуре: $\nu=14,16\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda=2,51\cdot 10^{-2}\text{ Вт/м}\cdot\text{K}$; $\alpha=20,0\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$.

9. Как изменится средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$ в условиях предыдущей задачи, если скорость набегающего потока воздуха увеличить в 2,5 и 10 раз? Указание. Для второго случая принять, что по всей длине пластины режим течения в пограничном слое турбулентный.

10. Плоская пластина длиной $l=2$ м и шириной $b=0,8$ м омывается с обеих сторон потоком воды со скоростью $v=2$ м/с. Температура поверхности пластины $t_c=80$ °С, температура воды $t_{\text{ж}}=20$ °С. Полагая режим движения в пограничном слое вдоль всей пластины турбулентным, определить средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$ и количество тепла Q , отдаваемое пластиной воде.

11. Вертикальный неизолированный трубопровод диаметром 76 мм и высотой 4 м омывается воздухом, средняя температура которого $t_{\text{ж}}=20$ °С. Температура поверхности трубопровода $t_c=60$ °С. Определить потерю теплоты трубопроводом.

12. Определить потерю теплоты в окружающую среду конвективным теплообменом от горизонтального неизолированного паропровода диаметром 100 мм и длиной 25 м с температурой наружной поверхности $t_{c1}=115$ °С, если температура воздуха $t_{\text{ж}}=15$ °С. Как изменится потеря теплоты трубопроводом, если его температуру снизить до $t_{c2}=80$ °С, заменив греющий пар горячей водой ?

13. По трубопроводу с внутренним диаметром $d=70$ мм проходит воздух, нагретый до температуры $t_{\text{ж}}=100$ °С и $t_{\text{ст}}=50$ °С. Определить значение коэффициента теплоотдачи, если скорость воздуха в трубопроводе $v=4,5$ м/с, $\lambda_{\text{ж}}=0,0321$ Вт/(м·К); $\nu_{\text{ж}}=23,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\text{Pr}_{\text{ж}}=0,69$.

14. По трубопроводу с внутренним диаметром $d_1 = 50$ мм протекает вода со скоростью $v=0,8$ м/с при средней температуре $t_{\text{ж}} = 50$ °С. Температура стенки трубы $t_c = 65$ °С. $Pr_c = 3,28$.

Определить потерю теплоты с 1 м трубы.

15. Определить коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании воздухом трубы, диаметр которой 25 мм, если температура воздуха $T_{\text{ж}}=20$ °С и скорость $v = 5$ м/с.

16. Змеевик из труб диаметром 10 мм омывается поперечным потоком воды со скоростью $v=0,75$ м/с. Температура воды $t_{\text{ж}}=80$ °С. Температура стенки трубы $t_c=50$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи.

17. По трубопроводу с внутренним диаметром $d=150$ мм проходит воздух, нагретый до температуры $T_{\text{ж}}=100$ °С. Определить значение коэффициента теплоотдачи, если скорость воздуха в трубопроводе $v=10$ м/с. При $T_{\text{ж}}=100$ °С, $\lambda_{\text{ж}} = 0,0321$ Вт/м·К; $\nu_{\text{ж}} = 23,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

18. Найти коэффициент теплоотдачи для 8-рядного коридорного пучка, если диаметр труб $d=40$ мм, средняя температура воздуха $t_{\text{ж}}=300$ °С, средняя скорость воздуха $v=10$ м/с, угол атаки $\psi = 60^\circ$.

19. Найти коэффициент теплоотдачи в поперечном потоке воздуха для отдельно взятой трубы диаметром 20 мм, если $t_{\text{ж}}=30$ °С и скорость воздуха 5 м/с.

20. Определить коэффициент теплоотдачи при поперечном омывании трубы, диаметр которой 25 мм, если температура воздуха $t_{\text{ж}}=20$ °С и скорость $v_{\text{ж}}=5$ м/с.

21. По трубопроводу с внутренним диаметром $d = 50$ мм протекает вода со скоростью $v=0,8$ м/с при средней температуре $t_{ж}=50$ °С. Температура стенки трубы $t_c=65$ °С. Определить потери тепла с поверхности 1 метра трубы.

22. Определить коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней стенке трубы диаметром 17 мм, если температура стенки $t_c=30$ °С, а температура воды в трубе $t_{ж}=60$ °С. Скорость воды $v= 0,5$ м/с.

23. Тонкая пластина длиной $l_0=125$ мм обтекается продольным потоком жидкости. Температура набегающего потока $t_{ж}=20$ °С. Температура поверхности пластины $t_c=50$ °С. Вычислить значения среднего коэффициента теплоотдачи и теплового потока с 1 метра пластины для двух случаев: 1) пластина обтекается воздухом при скорости 10 м/с; 2) пластина обтекается водой со скоростью 2 м/с.

Тесты по теме «Конвекция»

1. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B, n, m) этого уравнения для ламинарного движения около горизонтальной пластины:

- а) 0,37; 0,5; 0,15;
- б) 0,66; 0,33; 0,25;
- в) 0,66; 0,5; 0,33;
- г) 0,037; 0,8; 0,43.

2. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B,n,m) этого уравнения для турбулентного движения около горизонтальной пластины:

а) 0,37; 0,5; 0,15;

б) 0,66; 0,33; 0,25;

в) 0,66; 0,5; 0,33;

г) 0,037; 0,8; 0,43.

3. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B,n,m) этого уравнения для ламинарного движения в трубе:

а) 0,37; 0,5; 0,15;

б) 0,15; 0,33; 0,25;

в) 0,66; 0,5; 0,33;

г) 0,15; 0,33; 0,43.

4. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B,n,m) этого уравнения для турбулентного движения в трубе:

- а) 0,021; 0,5; 0,15;
- б) 0,066; 0,33; 0,25;
- в) 0,66; 0,8; 0,33;
- г) 0,021; 0,8; 0,43.

5. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B,n,m) этого уравнения для поперечного обтекания трубы ($10 < Re_{ж} < 10^3$):

- а) 0,15; 0,5; 0,15;
- б) 0,5; 0,5; 0,25;
- в) 0,5; 0,5; 0,38;
- г) 0,21; 0,8; 0,43.

6. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B, n, m) этого уравнения для поперечного обтекания трубы $(10^3 < Re_{ж} < 10^9)$:

а) 0,15; 0,5; 0,15;

б) 0,25; 0,6; 0,25;

в) 0,5; 0,5; 0,38;

г) 0,21; 0,8; 0,43.

7. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B, n, m) этого уравнения для поперечного обтекания коридорных пучков труб:

а) 0,25; 0,5; 0,25;

б) 0,23; 0,65; 0,33;

в) 0,25; 0,65; 0,38;

г) 0,21; 0,6; 0,33.

8. Для вынужденной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha / \lambda = B Re^n Pr^m Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (B, n, m) этого уравнения для поперечного обтекания шахматных пучков труб:

а) 0,25; 0,5; 0,33;

б) 0,23; 0,65; 0,33;

в) 0,25; 0,65; 0,38;

г) 0,41; 0,6; 0,33.

9. Для свободной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha / \lambda = A (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^m (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (A, m) этого уравнения для ламинарного движения около горизонтальных труб:

а) 0,5; 0,25;

б) 0,66; 0,33;

в) 0,66; 0,5;

г) 0,37; 0,43.

10. Для свободной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha / \lambda = A (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^m (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (A,m) этого уравнения для ламинарного движения около вертикальных труб:

а) 0,76; 0,25;

б) 0,65; 0,33;

в) 0,65; 0,5;

г) 0,37; 0,25.

11. Для свободной конвекции в целях расчёта числа Нуссельта и определения коэффициента теплоотдачи α предложено следующее уравнение подобия:

$$Nu = \alpha l / \lambda = A (Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})^m (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}.$$

Укажите правильный набор постоянных коэффициентов (A,m) этого уравнения для турбулентного движения около вертикальных труб:

а) 0,76; 0,25;

б) 0,15; 0,33;

в) 0,65; 0,25;

г) 0,6; 0,25.

7. ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Основные понятия и закономерности:

♦ обобщённые переменные краевой задачи нестационарной теплопроводности, физический смысл чисел Фурье, Померанцева, Кирпичёва, Био;

♦ безразмерная температура и относительное изменение энтальпии при нагреве и охлаждении тела, методика определения температуры и теплосодержания тел различной формы в задачах нестационарной теплопроводности, регулярный режим нагрева и охлаждения.

♦ номограммы для расчёта температурных полей и изменения теплосодержания тел различной формы.

Задачи

1. Пластина из хромоникелевой стали (25 % Cr, 20 % Ni), толщиной $2\delta=40$ мм, имеющая температуру $t_o=20$ °C, помещена в печь с температурой $t_{cp}=1200$ C. Определить температуру пластины в ее центре $t_{ц}$ и на поверхности n через $t=15$ мин после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно $\lambda=12,7$ Вт/(м·K), $a=3,60\cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины $\alpha=150$ Вт/(м·K).

2. Длинный стальной вал диаметром $2R_0=400$ мм, нагретый до температуры $t_o=800$ °C, охлаждается в среде с постоянной температурой $t_{cp}=20$ °C. Определить время τ , в течение которого температура поверхности цилиндра понизится до $t_{п}=300$ °C. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали соответственно равны $\lambda=45,5$ Вт/(м·K), $c_p=502$ Дж/(кг K) и $\rho=7800$ кг/м³. Коэффициент теплоотдачи с поверхности вала в процессе охлаждения остается постоянным и равным $\alpha = 150$ Вт/(м·K).

3. При условиях охлаждения стального вала, рассмотренных в задаче 2, определить, какова будет к найденному моменту времени $\tau=46$ мин температура на оси вала $t_{\text{ц}}$. Определить также количество тепла Q , которое будет в течение этого времени отдано окружающей среде от $l=1$ м вала.

4. Лист алюминия толщиной $2\delta=20$ мм, прогретый до температуры $t_0=500$ °С, помещен в воздушную среду, температура которой $t_{\text{ср}}=20$ °С. Определить промежуток времени τ , по истечении которого лист примет температуру, отличающуюся не более чем на 1 % от температуры окружающей среды. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности алюминия равны соответственно: $\lambda=203$ Вт/(м·К); $a=8,32 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи от поверхности листа к окружающему воздуху $\alpha=60$ Вт/(м²·К).

5. Слиток из хромоникелевой стали (18 % Сг, 8 % Ni) в форме параллелепипеда размерами 300x500x800 мм, имеющий начальную температуру $t_0=20$ °С, помещен для нагрева в печь с температурой $t_{\text{ср}}=1200$ °С. Определить температуру $t_{\text{ц}}$ в центре слитка через $\tau=2$ ч после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности стали равны соответственно: $\lambda=16,0$ Вт/(м·К); $a=4,57 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка $\alpha=160$ Вт/(м·К).

6. Два листа стали, имеющие начальную температуру $t_0=20$ °С свариваются вместе посредством заливания расплавленного металла между ними. Температура, поддерживаемая на торцах листов в процессе сварки, $t_{\text{п}}=1500$ °С. Считая, что температура $t_{\text{п}}$ устанавливается внезапно, и пренебрегая потерями тепла с поверхности листов, определить температуру на расстоянии $x=10$ мм от торца листа через $\tau=20$ с после начала сварки. Коэффициент

теплопроводности, теплоемкость и плотность стали соответственно равны: $\lambda=46,3$ Вт/(м·К); $c_p=478$ Дж/(кг·К) и $\rho=7800$ кг/м³.

7. По условиям предыдущего примера определить расход тепла Q через 1 м торца листа за время $\tau=20$ с после начала сварки.

8. Шар из плавленного кварца радиусом 10 см, имеющий начальную температуру $t_1=200$ °С, помещен в среду с температурой $t_{\text{ср}}=120$ °С. Найти время τ , за которое его температура понизится до $t_2=130$ °С, если охлаждение протекает в регулярном режиме. Коэффициент температуропроводности плавленного кварца $a=3 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

9. Углерод диффундирует в цирконий при температуре 1600 °С из источника с постоянной концентрацией углерода 3% атм. Через какое время концентрация углерода на расстоянии 1 мм от поверхности станет равной 0,3 % атм.? Коэффициент диффузии углерода в цирконии при указанной температуре составляет $3 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

10. Стальная пластина толщиной $2\delta=80$ мм, имеющая температуру $t_0=20$ °С, помещена в печь с температурой среды $t_{\text{ср}}=1000$ °С. Определить время нагрева τ , необходимое для того, чтобы температура в средней плоскости пластины достигла величины $t_{\text{ц}}=800$ С. Коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и плотность стали равны соответственно: $\lambda=40$ Вт/(м·К); $c_p=445$ Дж/(кг·К); $\rho=7800$ кг/м³. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины $\alpha=120$ Вт/(м²·К).

11. Определить количество тепла Q , воспринятого 1 м² поверхности пластины, описанной в задаче 10, за найденное по условиям этой задачи время.

12. Для условий задачи 10 определить значения температур в средней плоскости и на поверхности пластины через $\tau=20$ мин после начала нагрева.

13. Стальная пластина толщиной $2\delta=200$ мм, имевшая температуру $t_0=20$ °С, была помещена в печь с температурой $t_{\text{ср}}=1000$ °С. Определить температуру пластины в ее средней плоскости $t_{\text{ц}}$ и на поверхности $t_{\text{п}}$ через $\tau=1,5$ ч после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно: $\lambda=45,7$ Вт/(м·К); $a=10,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины $\alpha=160$ Вт/(м·К).

14. Используя условия задачи 13, определить промежуток времени t , по истечении которого температура на поверхности пластины достигнет величины $t_{\text{п}}=980$ °С.

Определить также температуру $t_{\text{ц}}$ в средней плоскости пластины в конце нагрева.

15. Длинный стальной вал диаметром $2R_0=300$ мм, нагретый до температуры $t_0=1000$ °С, помещен для охлаждения в воздушную среду с температурой $t_{\text{ср}}=20$ °С.

Рассчитать температуру на оси вала для интервалов времени $\tau=0,5; 1; 2$ и 3 ч после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно $\lambda=48,5$ Вт/(м·К); $c_p=511$ Дж/(кг·К); $\rho=7860$ кг/м³. Коэффициент теплоотдачи с поверхности вала в процессе охлаждения остается постоянным и равным $\alpha=150$ Вт/(м·К).

16. Для условий задачи 15 определить количество тепла, отданное окружающей среде 1 м вала в процессе охлаждения за указанные промежутки времени.

17. Длинный стальной цилиндр диаметром $2R_0=360$ мм, имеющий температуру $t_0=20$ °С, помещен в печь с температурой $T_{cp}=800$ °С. Определить температуру цилиндра на его оси $T_{ц}$ и на поверхности $t_{п}$ через $\tau=1$ ч после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны соответственно: $\lambda=40$ Вт/(м·К); $a=9,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра $\alpha=120$ Вт/(м·К).

18. По условиям задачи 17 определить время τ , в течение которого температура поверхности цилиндра достигнет величины $t_{п}=780$ °С. Определить также температуру $t_{ц}$ на оси цилиндра в конце нагрева.

19. Определить время τ , необходимое для нагрева листа меди толщиной $2\delta=40$ мм до 600 °С. Лист имел начальную температуру $t_0=20$ °С и был помещен в печь с температурой $t_{г}=750$ °С. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности меди равны соответственно: $\lambda=95$ Вт/(м·К); $a=1,164 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности листа $\alpha=60$ Вт/(м·К). Указание. Так как при данных условиях $Bi \ll 0,1$, то можно для расчета воспользоваться предельным законом: $\theta = \exp(-Bi \cdot Fo)$.

20. Длинный прямоугольный стержень из углеродистой стали размерами 80×160 мм помещен в печь с температурой $t_{г}=1200$ °С, $t_0=20$ °С. Определить температуру на оси стержня $t_{x=0,y=0}$ и на осевых линиях его граней ($t_{x=\delta_x,y=0}$ и $t_{x=0,y=\delta_y}$) через $\tau=25$ мин после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно: $\lambda=53,3$ Вт/(м·К); $a=14,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности стержня $\alpha=160$ Вт/(м·К).

21. Стальной брусок размерами 160x240x800 мм, нагретый до температуры $t_0=850\text{ }^{\circ}\text{C}$, погружен в масляную ванну, имеющую температуру $t_{\text{cp}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить температуру $t_x=0, y=0, z=0$ в центре бруска через 30 мин после начала охлаждения. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно: $\lambda=57\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $a=15\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи на поверхности бруска $\alpha=600\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

22. При условиях охлаждения стального бруска, указанных в задаче 21, определить температуры $t_x=\delta_x, y=0, z=0$; $t_x=0, y=\delta_y, z=0$; $t_x=0, y=0, z=\delta_z$ в середине граней бруска.

23. Болванка из алюминиевой бронзы (95 % Cu, 5 % Al) цилиндрической формы диаметром $2R_0=200\text{ мм}$ и длиной $2\delta=400\text{ мм}$, имеющая температуру $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, помещена в печь с температурой $t_{\text{c p}}=800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить температуру $t_{x=0, R=0}$ в центре болванки и $t_x=\delta, R=0$ в середине торцевой поверхности через $\tau=30$ мин после начала нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности бронзы равны соответственно: $\lambda=82,5\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $a=23,3\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи на поверхности болванки $\alpha=116\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

24. Графитовый блок в форме параллелепипеда размерами 400x600x800 мм, нагретый до температуры $t_0=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, охлаждается на воздухе, который имеет температуру $t_c=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить температуру t_c в центре блока через 1 ч после начала охлаждения. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности графита равны соответственно: $\lambda=144,5\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $a=110\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи на поверхности блока $\alpha=130\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

25. При условиях охлаждения графитового блока, указанных в задаче 24, определить температуры $t_x=\delta x$, $y=0$, $z=0$; $t_x=0$, $y=\delta y$, $z=0$; и $t_x=0$, $y=0$, $z=\delta z$ в середине граней блока.

26. Поверхность стального слитка, равномерно нагретого до температуры $t_0=700^\circ\text{C}$, внезапно охлаждена до $t=20^\circ\text{C}$. Рассматривая температурное поле в слитке как одномерное, определить температуру на глубине $x=200$ мм от поверхности через $\tau=1$ ч после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно: $\lambda=48,5$ Вт/(м·К); $c_p=511$ Дж/(кг·К); $\rho=7860$ кг/м³.

27. При условиях охлаждения стального слитка, рассмотренных в задаче 26, определить количество тепла Q , отданное 1м² поверхности слитка, за время охлаждения.

28. По условиям задачи 26 определить время, в течение которого температура на глубине $x=200$ мм от поверхности слитка понизится до 50°C .

29. Одна из сторон толстой асбестовой пластины, имеющей начальную температуру $t_0=20^\circ\text{C}$, внезапно нагрета до $t_n=800^\circ\text{C}$. Определить температуру на расстоянии $x=10$ мм от поверхности через 1ч после начала нагрева. Коэффициент теплопроводности асбеста $a=2,54\cdot 10^{-7}$ м²/с.

30. Используя условия задачи 29, определить расстояние x от поверхности асбестовой пластины, на котором через $\tau=10$ мин после начала нагрева температура повысится не более чем на 1 % от ее начального значения.

31. Определить температуру на оси длинного асбоцементного цилиндра радиусом $R_0=9,62$ см после двадцатиминутного охлаждения в среде с температурой

$T_{ср}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ по регулярному режиму. Начальная температура цилиндра $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплофизические свойства асбоцемента: теплопроводность $\lambda=0,26\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, теплоемкость $c_p=0,838\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, плотность $\rho=1300\text{ кг/м}^3$.

32. Цилиндрический слиток германия с начальной температурой $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ нагревается в среде с постоянной температурой $t_{ф}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивающей изменение температуры в регулярном режиме. Определить время нагрева слитка до температуры $t=145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Размеры слитка: радиус $R_0=4,81\text{ см}$, высота $h=31,4\text{ см}$. Теплофизические свойства германия: теплопроводность $\lambda=60\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, теплоемкость $c_p=0,419\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, плотность $\rho=5320\text{ кг/м}^3$.

33. Испаритель с жидким четыреххлористым кремнием (радиус $R_0=2,405\text{ см}$, высота $h=12,56\text{ см}$) с начальной температурой $t_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ опускается в термостат с температурой $t_{ф}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Через какое время τ его температура будет отличаться от температуры термостата на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплофизические свойства четыреххлористого кремния: $\lambda=0,12\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $C=0,85\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $\rho=1500\text{ кг/м}^3$.

34. Шамотный тигель сложной конфигурации охлаждается в регулярном режиме с темпом изменения температуры $m=2\cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$. Определить коэффициент формы тигля, если шамот обладает следующими теплофизическими свойствами: теплопроводность $\lambda=0,25\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, теплоемкость $c_p=0,84\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, плотность $\rho=950\text{ кг/м}^3$.

35. Пластина из талькохлорита толщиной $2\delta=2\text{ см}$ охлаждается в регулярном режиме в среде с температурой $t_{ф}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить коэффициент теплопроводности талькохлорита λ , если за $12,8\text{ мин}$ его температура изменилась

от 400 до 300 °С. Считать пластину неограниченной. Теплоемкость талькохлорита $c_p=1$ кДж/(кг·К), а его плотность $\rho=2700$ кг/м³.

36. Два нагретых шаровых слитка радиусом $R_0=10$ см, один из меди, другой из сурьмы, охлаждаются в среде, обеспечивающей коэффициент теплоотдачи $\alpha=10$ кВт/(м·К). Считая условием наступления регулярного режима величину $Bi>50$, определить, для какого материала в указанных условиях справедлива теорема Кондратьева. Теплопроводности меди и сурьмы соответственно равны 420 и 15 Вт/(м·К).

37. Резиновая пластина толщиной $2\delta=20$ мм, нагретая до температуры $t_0=140$ °С, помещена в воздушную среду с температурой $t_{cp}=15$ °С. Определить температуры в середине и на поверхности пластины через 20 минут после начала охлаждения. Коэффициент теплопроводности резины 0,175 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности равен $0,833 \cdot 10^{-7}$ м²/с, коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к воздуху 65 Вт/(м·К).

38. Для условий задачи 37 определить температуру на расстоянии $x=\delta/2=5$ мм от середины пластины. Определить также безразмерные температуры в середине и на поверхности пластины расчётным путём и сравнить результаты расчета со значениями t_d и t_n , полученными в задаче 37.

39. Определить промежуток времени, по истечении которого лист стали, прогретый до $t_0=500$ °С, будучи помещён в воздушную среду с температурой $t_{cp}=20$ °С, примет температуру, отличающуюся не более, чем на 1 % от температуры окружающей среды. Толщина листа $2\delta=20$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda=45,5$ Вт/(м·К), теплоёмкость стали $c=0,46$ кДж/(кг·К), плотность $\rho=7900$ кг/м³. Коэффициент

теплоотдачи от листа к воздуху $\alpha=35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Указание: вначале оценить критерий Био.

40. Определить время, необходимое для нагрева листа стали толщиной $2\delta=24 \text{ мм}$, который имел температуру $t_0=25^\circ\text{C}$, а затем был помещён в печь с температурой $t_{\text{ср}}=600^\circ\text{C}$. Нагрев считать оконченным, когда температура листа достигнет значения $t=450^\circ\text{C}$. Для стали $\lambda=45,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $c=0,502 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $\rho=7800 \text{ кг}/\text{м}^3$. Коэффициент теплоотдачи к поверхности листа $\alpha=23,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

41. Длинный стальной вал диаметром $d=2R_0=120 \text{ мм}$, который имел температуру $t_0=20^\circ\text{C}$, помещён в печь с температурой $t_{\text{ср}}=820^\circ\text{C}$. Определить время, необходимое для нагрева вала, если нагрев считается законченным, когда температура на оси вала $t_R=800^\circ\text{C}$. Определить также температуру на поверхности вала $t_R=R_0$ в конце нагрева. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны соответственно $\lambda=21 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $a=6,11\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha=140 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

42. Определить значение температур на поверхности и на оси вала через 20 минут и через 40 минут после загрузки стального вала в печь по условиям задачи 41.

43. Для условий задачи 41 определить температуру на расстоянии $R=R_0$ от оси вала через 20 минут после нагрева. Определить также расчётным путём температуры на поверхности и оси вала по истечении того же промежутка времени и сравнить результаты расчёта с ответом, полученным в задаче 42.

44. Стальная болванка цилиндрической формы диаметром $d=80 \text{ мм}$ и длиной $l=160 \text{ мм}$ в начальный момент времени была равномерно нагрета до температуры $t_0=800^\circ\text{C}$. Болванка

охлаждается на воздухе, который имеет температуру $t_{\text{ср}}=30$ °С. Определить температуры в центре на оси болванки и в середине торцевой поверхности через 30 минут после начала охлаждения. Коэффициенты теплопроводности и температура проводности стали соответственно равны: $\lambda=23,3$ Вт/(м·К) и $a=6,11 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности болванки $\alpha=118$ Вт/(м²·К).

45. Длинная стальная балка прямоугольного сечения с размерами в поперечном сечении 400х320 мм в начальный момент времени имела температуру $t_0=1000$ °С, а затем была помещена для охлаждения в среду с температурой $t_{\text{ср}}=20$ °С. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали соответственно равны: $\lambda=32$ Вт/(м·К) и $a=7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности болванки $\alpha=170$ Вт/(м²·К). Рассчитать температуру на оси балки для моментов времени 1, 2, 3 и 4 часа после начала охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щетинин, А. А. Физические основы тепломассопереноса [Текст]: учеб. пособие / А. А. Щетинин, Л. С. Печёнкина, В. А. Аммер. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014, 197с.

2. Цаплин, А. И. Теплофизика в металлургии [Текст]: учеб. пособие / А. И. Цаплин. - Пермь: Издательство Пермского гос. техн. ун-та, 2008. - 230с.

3. Кузовлёв, В. А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи [Текст]: учеб. пособие / В. А. Кузовлёв. - М.: Высш. шк., 1975.- 303 с.

4. Теплотехника: Сборник задач по тепломассообмену [Текст]: учеб. пособие / В. П. Юркинский, Е. Г. Фирсова, И. Б. Сладков, В. А. Зайцев. - СПб: Изд-во политехнич. университета, 2007. - 93 с.

5. Ерохин, В. Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники [Текст]: сборник задач / В. Г. Ерохин. - М.: Энергия, 1979. - 240 с.

6. Решение задач по физическим основам тепломассопереноса [Текст]: метод. указания для проведения и организации самостоятельной работы по дисциплине «Теплофизика» для студентов направления 22.03.02 «Металлургия» профиля «Технология литейных процессов» /: Воронеж. гос. техн. ун-т; сост. А. А. Щетинин, Л. С. Печенкина. Воронеж, 2015. 231с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Основные законы тепло- и массопереноса	5
2. Течение идеальной и вязкой жидкости	20
3. Тепловое излучение	40
4. Стационарная теплопроводность	53
5. Элементы теории подобия	71
6. Конвекция	79
7. Задачи нестационарной теплопроводности	89
Библиографический список	100

Учебное издание

Печенкина Лариса Степановна

Щетинин Анатолий Антонович

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
ДЛЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕПЛОФИЗИКА»**

Компьютерная верстка Л.С. Печенкиной

Подписано к изданию 18.06.2018.

Объем данных 0,6 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14