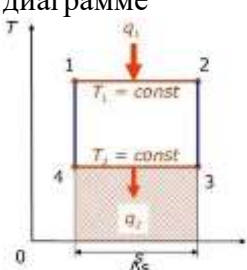
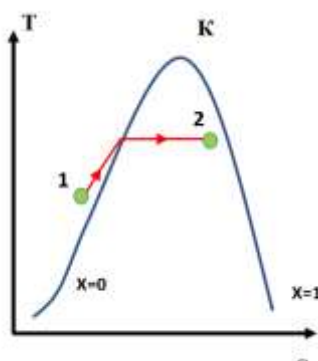
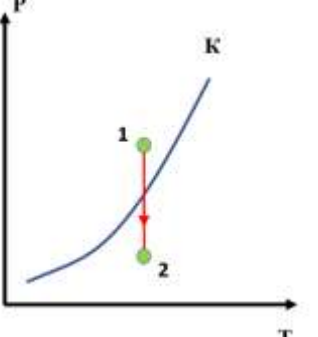
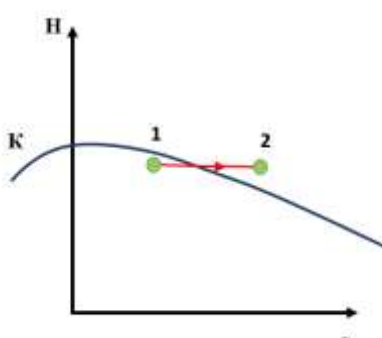
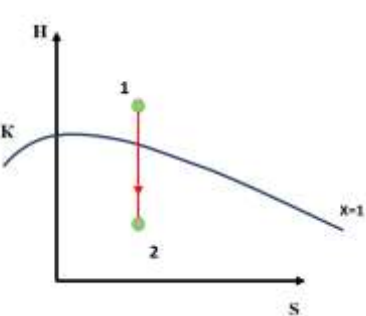


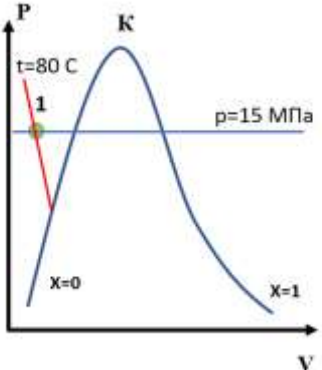
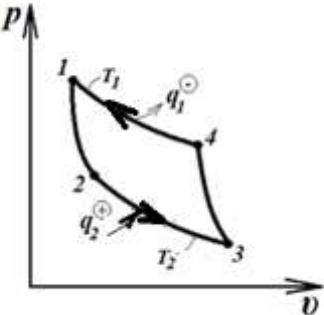
## Банк заданий по базовой части вступительного испытания в магистратуру

## Задание экзаменационного билета № 1 (10 баллов)

| №   | Задание  | Варианты ответов   | Отв<br>т |
|-----|--|--|----------|
| 1.1 | Уравнения для расчета теплоты, подводимой к потоку в изобарном процессе идеального газа                                      | $q = c_v(T_2 - T_1)$<br>$dq = du$<br>$q = \Delta h$<br>$q = u$   |          |
| 1.2 | Суживающее сопло – это устройство, в котором (выберите верные утверждения)   | 1. скорость потока газа не изменяется.<br>2. увеличивается скорость потока газа.<br>3. площадь входного и выходного сечения одинаковы.<br>4. давление потока газа не изменяется.                                   |          |
| 1.3 | Сопло Лавала – это устройство (выберите верные утверждения)  | 1. для получения сверхзвуковых потоков.<br>2. для получения низких скоростей потока.<br>3. в котором скорость потока не изменяется по длине канала.<br>4. в котором давление потока не изменяется по длине канала. |          |
| 1.4 | Какой цикл изображен на T-s диаграмме<br> | Карно<br>Дизеля<br>Ренкина<br>Тринклера<br>Бойля-Мариотта  |          |
| 1.5 | Уравнение 1 закона термодинамики в дифференциальном виде   | $Q = L$<br>$dq = du + pdv$<br>$dq = Tds$<br>$Q = T(S_2 - S_1)$<br>$Q = m(h_2 - h_1)$   |          |
| 1.6 | Выберите верное утверждение для изотермического процесса сжатия идеального газа  | 1. $l_{\Delta v} = 0$<br>2. $q = 0$<br>3. $q = l_{\Delta v}$<br>4. $l_{\Delta v} = p(v_2 - v_1)$<br>5. $q = \Delta u$  |          |
| 1.7 | Выберите формулу для расчета термического КПД цикла Карно  | $\eta_t = \frac{q_x}{ q_{o.c.}  - q_x}$<br>$\eta_t = 1 + \frac{T_2}{T_1}$<br>$\eta_t = 1 + \frac{q_1}{q_2}$  |          |

|      |  |  |  |
|------|--|--|--|
|      |  | $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$   |  |
| 1.8  | Чему равна теплота в изохорном процессе для идеального газа?                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>Q = U_2 - U_1</math></li> <li>2. <math>Q = H_2 - H_1</math></li> <li>3. <math>Q = p \cdot (V_2 - V_1)</math></li> <li>4. <math>Q = 0</math></li> </ol>                                   |  |
| 1.9  | Чему равна работа в изохорном процессе для идеального газа?                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>L = U_2 - U_1</math></li> <li>2. <math>L = p \cdot (V_2 - V_1)</math></li> <li>3. <math>L = 0</math></li> <li>4. <math>L = H_1 - H_2</math></li> </ol>                                   |  |
| 1.10 | Чему равна теплота в изобарном процессе для идеального газа?                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>Q = 0</math></li> <li>2. <math>Q = U_2 - U_1</math></li> <li>3. <math>Q = H_2 - H_1</math></li> <li>4. <math>Q = p \cdot (V_2 - V_1)</math></li> </ol>                                   |  |
| 1.11 | Чему равна работа в изобарном процессе для идеального газа?                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>L = p \cdot (V_2 - V_1)</math></li> <li>2. <math>L = U_2 - U_1</math></li> <li>3. <math>L = 0</math></li> <li>4. <math>L = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}</math></li> </ol> |  |
| 1.12 | Выберите верное утверждения для адиабатного (изоэнтропного) процесса идеального газа | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>l_{\Delta v} = 0</math></li> <li>• <math>q = l</math></li> <li>• <math>S = const</math></li> <li>• <math>\Delta u = 0</math></li> <li>• <math>p = const</math></li> </ul>                 |  |
| 1.13 | Выберите верные формулы для расчета степени сухости влажного пара                    | $x = \frac{h'' - h'}{v'' - v'}$ ; $x = \frac{h_x - h'}{h'' - h'}$ $x = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}$ $x = \frac{T_x - h'}{h'' - h'}$  |  |
| 1.14 | <p>Какому состоянию воды соответствуют точка 1 на T-s диаграмме</p>                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Влажный пар.</li> <li>2. Сухой насыщенный пар.</li> <li>3. Перегретый пар</li> <li>4. Жидкость</li> </ol>  |  |

|             |  |   |  |
|-------------|--|---|--|
| <p>1.15</p> | <p>Укажите какой тип процесса представлен линией 1-2 на графике в T,s- диаграмме</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Изобарный</li> <li>2. Изотермический</li> <li>3. Изохорный</li> <li>4. Адиабатный (изоэнтропный)</li> <li>5. Адиабатное дросселирование</li> </ol> |  |
| <p>1.16</p> | <p>Укажите какой тип процесса представлен линией 1-2 на графике в p,T диаграмме</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Изобарный</li> <li>2. Изотермический</li> <li>3. Изохорный</li> <li>4. Адиабатный (изоэнтропный)</li> <li>5. Адиабатное дросселирование</li> </ol> |  |
| <p>1.17</p> | <p>Укажите какой тип процесса представлен линией 1-2 на графике</p>                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Изобарный</li> <li>2. Изотермический</li> <li>3. Изохорный</li> <li>4. Адиабатный (изоэнтропный)</li> <li>5. Адиабатное дросселирование</li> </ol> |  |
| <p>1.18</p> | <p>Укажите какой тип процесса представлен линией 1-2 на графике</p>                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Изобарный</li> <li>2. Изотермический</li> <li>3. Изохорный</li> <li>4. Адиабатный (изоэнтропный)</li> <li>5. Адиабатное дросселирование</li> </ol> |  |

|      |   |  |  |
|------|---|--|--|
| 1.19 | <p>Какому состоянию воды соответствует точка 1 на T-s диаграмме</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Влажный пар.</li> <li>2. Сухой насыщенный пар.</li> <li>3. Перегретый пар</li> <li>4. Жидкость</li> </ol>                                  |  |
| 1.20 | <p>Внутренняя энергия идеального газа зависит только от</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. давления</li> <li>2. температуры</li> <li>3. не зависит от параметров</li> <li>4. влажности</li> <li>5. энтропии</li> </ol>                |  |
| 1.21 | <p>Какой цикл изображен на p-v диаграмме</p>                        | <p>Прямой цикл Карно<br/>Обратный цикл Карно<br/>Дизеля<br/>Ренкина<br/>Тринклера<br/>Бойля-Мариотта</p>   |  |
| 1.22 | <p>Как называется точка, в которой сосуществуют три фазы реального газа (жидкая, газообразная и твердая)?</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. тройная точка;</li> <li>2. точка сублимации;</li> <li>3. точка инверсии;</li> <li>4. критическая точка;</li> <li>5. точка росы.</li> </ol> |  |

Пример выполнения задания

|  |   |   |  |
|--|---|---|--|
|  | <p>В каком соотношении находятся термические КПД цикла Ренкина (<math>\eta_p</math>) и цикла Карно (<math>\eta_k</math>)?</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>\eta_p &gt; \eta_k</math></li> <li>2. <math>\eta_p \geq \eta_k</math></li> <li>3. <math>\eta_p = \eta_k</math></li> <li>4. <math>\eta_p \leq \eta_k</math></li> <li>5. <math>\eta_p &lt; \eta_k</math></li> </ol> |  |
|--|---|---|--|

Согласно теореме Карно коэффициент полезного действия любой тепловой машины, работающей в интервале температур  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1$  - температура нагревателя и  $T_2$  - температура холодильника) не может быть больше к.п.д. машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур, поэтому правильный ответ – 5.

## Задание экзаменационного билета № 2 (10 баллов)

### Задание 2.1

Аналитические выражения первого закона термодинамики в интегральном и дифференциальном виде. Формулы, описание термодинамических функций состояния и функций процесса, входящих в уравнения.

### Задание 2.2

Уравнение первого закона термодинамики для потока вещества. Теплота и работа в потоке. Описание величин, входящих в уравнение.

### Задание 2.3

Уравнение первого закона термодинамики для неравновесных процессов. Описание величин, входящих в уравнение. Изображение произвольного неравновесного процесса в  $p, v$ - диаграмме.

### Задание 2.4

Термическое уравнение состояния идеального газа - уравнение Клайперона-Менделеева: для  $m$  кг газа. Описание величин, входящих в уравнение. Определение идеального газа. Прямой обратимый цикл Карно, графики цикла в  $p, v$  - и  $T, s$  - диаграммах, КПД цикла Карно.

### Задание 2.5

Изобарный процесс идеального газа. Соотношения параметров, расчет теплоты и работы расширения в изобарном процессе. Изображение процесса в  $p, v$  - и  $T, s$  - диаграммах.

### Задание 2.6

Изохорный процесс идеального газа. Соотношения параметров, расчет теплоты и работы расширения в изохорном процессе. Изображение процесса в  $p, v$  - и  $T, s$  - диаграммах.

### Задание 2.7

Изотермический процесс идеального газа. Соотношения параметров, расчет теплоты и работы расширения в изобарном процессе. Изображение процесса в  $p, v$  - и  $T, s$  - диаграммах.

### Задание 2.8

Адиабатный процесс идеального газа. Показатель адиабаты, уравнение адиабаты. Соотношения параметров, работа расширения и техническая работа. Изображение процесса в  $p, v$  - и  $T, s$  - диаграммах.

### Задание 2.9

Понятие энтропии, свойства энтропии. Интеграл Клаузиуса. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.

### Задание 2.10

Термодинамические тождества. Объединенные уравнения первого и второго законов термодинамики.

### Задание 2.11

Влажный воздух, определение, способы задания влажного воздуха. Парциальное давление компонентов, закон Дальтона.

### Задание 2.12

$p, v$  – и  $p, T$  – диаграммы воды и водяного пара. Линии изобар, изохор, изотерм на диаграммах. Обозначение фаз воды и водяного пара на диаграммах.

### Задание 2.13

$T-s$  диаграмма воды и водяного пара. Линии изобар, изохор, изотерм, постоянного  $x$  на диаграмме. Формулы расчета свойств влажного пара для:  $h$  энтальпии,  $v$  удельного объема,  $s$  энтропии.

### Задание 2.14

Адиабатный обратимый процесс расширения реального газа, расчет технической работы. Изображение процесса в  $p, v$  – и  $T, s$  – диаграммах.

### Задание 2.15

Изохорный процесс реального газа. Теплота и работа процесса, формулы для расчета. Изображение процесса в  $p, T$  –,  $p, v$  – и  $T, s$  – диаграммах, докритическая и сверхкритическая изохоры.

### Задание 2.16

Изобарный процесс реального газа. Теплота и работа процесса, формулы для расчета. Изображение процесса в  $p, T$  –,  $p, v$  – и  $T, s$  – диаграммах, докритическая и сверхкритическая. изобары

### Задание 2.17

Изотермический процесс идеального газа. Работа расширения и теплота, формулы для расчета. Изображение процесса в  $p, T$  –,  $p, v$  – и  $T, s$  – диаграммах, докритическая и сверхкритическая изотермы.

### Задание 2.18

Течение газа в суживающих соплах. Определение режима истечения идеального газа из суживающего сопла. Коэффициенты  $\beta$  и  $\beta_{кр}$ . Кризис течения.

### Задание 2.19

Методика расчета дозвукового режима истечения из суживающего сопла водяного пара без трения. Расчет скорости и массового расхода в соплах.

### Задание 2.20

Учет трения при истечении газа из сопел.  $h, s$  – диаграмма, формула расчета скорости на выходе из сопла. Скоростной коэффициент  $\varphi$  и коэффициент массы  $\mu$ .

### Пример выполнения задания

Политропный процесс, его обобщающее значение. Соотношение между термическими параметрами газа в политропном процессе. Расчет работы и теплоты в политропном процессе.

Все процессы идеального газа могут быть представлены как частные случаи политропного процесса с некоторым фиксированным показателем политропы (адиабатный процесс приближенно при  $k = \text{const}$ ).

$$p \cdot v^n = \text{const}$$

| Процесс   | $n$          | $c_n$ |
|-----------|--------------|-------|
| Изохорный | $\pm \infty$ | $c_v$ |

|                |     |              |
|----------------|-----|--------------|
| Изобарный      | 0   | $c_p$        |
| Изотермический | 1   | $\pm \infty$ |
| Адиабатный     | $k$ | 0            |
| Политропный    | $n$ | $c_n$        |

Изображение различных политроп в диаграмме  $p, v$  при этих фиксированных показателях политропы  $n$  показано на рисунке 1. График изменения теплоемкости газа в зависимости от заданного показателя политропы процесса представлена на рис. 2.

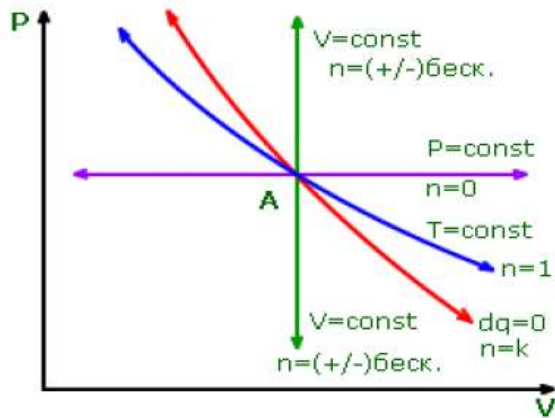


Рис. 1

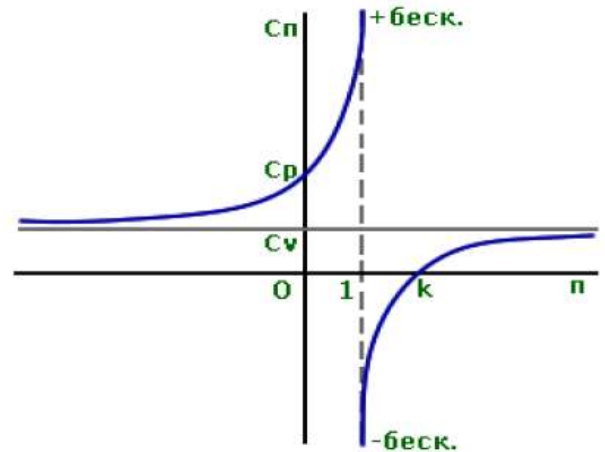


Рис. 2

### Соотношение между термическими параметрами

Соотношением между термическими параметрами газа в этом процессе получим, используя уравнение Первого закона:

$$dq = dh - v dp \quad \text{и} \quad c_n dT = c_p dT - v dp ;$$

$$dq = du + p dv \quad \text{и} \quad c_n dT = c_v dT + p dv .$$

Поделив эти уравнения, получим  $\frac{c_n - c_p}{c_n - c_v} = \frac{-v dp}{p dv}$ .

Показатель политропы  $n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$ .

Тогда  $n \cdot \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$  следовательно, проинтегрировав,

получим  $p v^n = const \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n$ .

Подставив  $p = \frac{RT}{v}$ ,  $T v^{n-1} = const \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}$ .

Подставив  $v = \frac{RT}{p}$ ,  $p^{1-n} T^n = const \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$ .

### Работа расширения газа

Для расчета работы расширения газа в политропном процессе используем (можно использовать любую из формул)

$$l = p_1 v_1 \frac{\left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]}{n-1}$$

$$l = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1}$$

$$l = \frac{R \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]}{n-1}$$

$$l = p_1 v_1 \frac{\left[ 1 - \frac{T_2}{T_1} \right]}{n-1}$$

$$l = \frac{R \cdot (T_2 - T_1)}{n-1}$$

$$l = \frac{R \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}{n-1}$$

*Теплота, подведенная в процессе*

Для расчета теплоты используем основное уравнение  $q = \int_1^2 c_n \cdot dT$ .

Теплоемкость газа в политропном процессе определим из  $n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$

$$c_n = \frac{c_v(n-k)}{n-1}$$

Тогда  $q = \int_1^2 c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} dT$  и, после интегрирования,  $q = \frac{(u_2 - u_1) \cdot (n-k)}{n-1}$ ,

где  $k = \frac{h_2 - h_1}{u_2 - u_1}$ . При приближенных вычислениях принимают  $c_v = const$ ,  $k = const$ . Тогда

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1).$$

### **Задание экзаменационного билета № 3 (10 баллов)**

#### **Задание 3.1**

К 3 кг газа подводится  $Q = 150$  кДж теплоты, при этом газ совершает работу  $l = 20$  кДж/кг. Определить изменение внутренней энергии рабочего тела  $\Delta U$ .

#### **Задание 3.2**

В изохорном процессе, энтальпия 4 кг воздуха увеличивается на 20 кДж, а температура повышается на 5°C. Рассчитать удельную подведенную теплоту. ( $R_{\text{возд}} = 287,1$  Дж/(кг·К)).

#### **Задание 3.3**

Определить среднюю изохорную теплоемкость диоксида азота в интервале температур от 350 до 850 °С, если известно, что внутренняя энергия в начале интервала  $u_1 = 408,2$  кДж/кг, а энтальпия в конце интервала  $h_2 = 1077,0$  кДж/кг. Сравнить результаты с расчетом по МКТТ. Молярная масса  $\mu_{\text{NO}_2} = 46,0053$  кг/кмоль.

#### **Задание 3.4**

При расширении 10 кг идеального газа совершается работа, равная 20 кДж. При этом к газу извне подводится 40 кДж теплоты, а его температура повышается на 5°C. Определите среднюю теплоемкость  $c_n$  этого процесса и среднюю изохорную теплоемкость  $c_v$  газа, выразите их в кДж/(кг·К).

### Задание 3.5

0,1 кг. двуокиси углерода при давлении  $7 \cdot 10^5$  Па и начальной температурой  $t_1 = 1112$  °F расширяются политропно до давления 0,24 МПа. Определить изменение внутренней энергии газа, совершенную работу и количество теплоты. Показатель политропы  $n = 1,11$ .

Для справки:  $t^{\circ\text{C}} = \frac{t^{\circ\text{F}} - 32}{1.8}$ ;

| CO <sub>2</sub>     |              |              |
|---------------------|--------------|--------------|
| $t^{\circ\text{C}}$ | $h$ , кДж/кг | $u$ , кДж/кг |
| 600                 | 817,54       | 652,58       |
| 512                 | 713,75       | 565,41       |

### Задание 3.6

Диоксид углерода совершает работу адиабатно обратимо в газовой турбине от начального состояния  $t_1 = 1000$  °С,  $p_1 = 1,799$  МПа до конечного давления 0,1 МПа. Определить удельную работу турбины. Использовать справочник свойств газов.

| CO <sub>2</sub>     |              |              |         |
|---------------------|--------------|--------------|---------|
| $t^{\circ\text{C}}$ | $h$ , кДж/кг | $u$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 1000                | 1317,6       | 1077,0       | 5872,7  |
| 546                 | 753,51       | 598,75       | 326,41  |

### Задание 3.7

Рассчитать удельную энтропию воздуха при температуре 250 °С и давлении 1,5 МПа. Принять за начало отсчёта нормальные условия.

Для справки: Нормальным условиям соответствуют:

Давление 101,325 кПа; Температура 0°С

| Воздух              |        |
|---------------------|--------|
| $t^{\circ\text{C}}$ | $S^0$  |
| 250                 | 7,4314 |
| 0                   | 6,7767 |

### Задание 3.8

Рассчитать работу газовой турбины приходящейся на 1 кг рабочего тела со свойствами воздуха, если температура на входе в турбину 940°С, на выходе 450 °С.

| Воздух              |              |              |
|---------------------|--------------|--------------|
| $t^{\circ\text{C}}$ | $h$ , кДж/кг | $u$ , кДж/кг |
| 940                 | 1293,6       | 945,40       |
| 450                 | 738,64       | 531,06       |

### Задание 3.9

Заданы параметры:  $P = 100$  бар,  $t = 270^{\circ}\text{C}$ . Определить состояние и найти  $v$ ,  $h$ ,  $s$ . Представить точку в PV, PT, HS, TS - диаграммах.

Таблица I. Свойства водяного пара в состоянии насыщения:

| $t$ | $p$    | $v'$      | $v''$    | $h'$   | $h''$  | $r$    | $s'$   | $s''$  | $s'' - s'$ |
|-----|--------|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 270 | 5,5028 | 0,0013030 | 0,035622 | 1185,1 | 2789,7 | 1604,6 | 2,9762 | 5,9304 | 2,9542     |

Таблица III. Свойства воды и водяного пара в однофазной области:

| $t$ | $p = 9,0$ МПа             |        |        | $p = 9,5$ МПа             |        |        | $p = 10,0$ МПа            |        |        | $p = 10,5$ МПа            |        |        |
|-----|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
|     | $t_{\text{нас}} = 303,35$ |        |        | $t_{\text{нас}} = 307,25$ |        |        | $t_{\text{нас}} = 311,00$ |        |        | $t_{\text{нас}} = 314,61$ |        |        |
|     | $v$                       | $h$    | $s$    | $v$                       | $h$    | $s$    | $v$                       | $h$    | $s$    | $v$                       | $h$    | $s$    |
| 250 | 0,0012429                 | 1085,7 | 2,7814 | 0,0012420                 | 1085,7 | 2,7802 | 0,0012412                 | 1085,7 | 2,7791 | 0,0012403                 | 1085,7 | 2,7779 |
| 260 | 0,0012673                 | 1134,2 | 2,8733 | 0,0012663                 | 1134,2 | 2,8720 | 0,0012653                 | 1134,1 | 2,8708 | 0,0012644                 | 1134,1 | 2,8695 |
| 270 | 0,0012946                 | 1184,0 | 2,9658 | 0,0012934                 | 1183,9 | 2,9644 | 0,0012923                 | 1183,7 | 2,9629 | 0,0012911                 | 1183,6 | 2,9615 |
| 280 | 0,0013254                 | 1235,3 | 3,0594 | 0,0013240                 | 1235,1 | 3,0577 | 0,0013226                 | 1234,8 | 3,0561 | 0,0013213                 | 1234,6 | 3,0545 |
| 290 | 0,0013608                 | 1288,5 | 3,1547 | 0,0013591                 | 1288,1 | 3,1528 | 0,0013574                 | 1287,7 | 3,1510 | 0,0013557                 | 1287,4 | 3,1491 |

### Задание 3.10

Водяной пар расширяется в турбине адиабатно и обратимо от параметров:  $P_1 = 160$  бар;  $t_1 = 560$  °С до давления 0,04 бар. Найти мощность турбины если расход пара  $G = 360$  т/час. Представить процесс в PV, HS, TS - диаграммах.

Таблица III. Свойства воды и водяного пара в однофазной области:

| t   | p= 15,0 МПа               |        |        | p= 16,0 МПа               |        |        | p= 17,0 МПа               |        |        | p= 18,0 МПа               |        |        |
|-----|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
|     | t <sub>нас</sub> = 342,16 |        |        | t <sub>нас</sub> = 347,36 |        |        | t <sub>нас</sub> = 352,29 |        |        | t <sub>нас</sub> = 356,99 |        |        |
|     | v                         | h      | s      | v                         | h      | s      | v                         | h      | s      | v                         | h      | s      |
| 550 | 0,022945                  | 3450,5 | 6,5230 | 0,021353                  | 3439,8 | 6,4832 | 0,019948                  | 3429,1 | 6,4451 | 0,018698                  | 3418,3 | 6,4085 |
| 560 | 0,023350                  | 3477,5 | 6,5556 | 0,021740                  | 3467,3 | 6,5164 | 0,020318                  | 3457,0 | 6,4788 | 0,019054                  | 3446,6 | 6,4427 |
| 570 | 0,023749                  | 3504,2 | 6,5875 | 0,022121                  | 3494,4 | 6,5488 | 0,020684                  | 3484,6 | 6,5117 | 0,019406                  | 3474,6 | 6,4762 |

Таблица II. Свойства водяного пара в состоянии насыщения:

| p      | t     | v'        | v''    | h'     | h''    | r      | s'     | s''    | s''-s' |
|--------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,0040 | 28,96 | 0,0010041 | 34,792 | 121,40 | 2553,7 | 2432,3 | 0,4224 | 8,4735 | 8,0510 |

Пример выполнения задания

Диоксид углерода совершает работу адиабатно обратимо в газовой турбине от начального состояния  $t_1 = 1050$  °С,  $p_1 = 2,38$  МПа до конечного давления 0,1 МПа. Определить удельную работу турбины. Использовать справочник свойств газов.

| CO <sub>2</sub> |           |           |                |
|-----------------|-----------|-----------|----------------|
| t°С             | h, кДж/кг | u, кДж/кг | π <sub>0</sub> |
| 1050            | 1382,4    | 1132,5    | 7651,7         |
| 544             | 751,16    | 596,78    | 321,49         |

$$l = h_1 - h_2$$

$$h_1 = 1382,4 \text{ кДж/кг}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\pi_{02}}{\pi_{01}}$$

$$\pi_{02} = \frac{0,1}{2,38} \cdot 7651,7 = 312,5$$

$$h_2 = 751,16 \text{ кДж/кг}$$

$$l = 631,24 \text{ кДж/кг}$$

### Задание экзаменационного билета № 4 (10 баллов)

#### Задание 4.1

Начальное состояние пара:  $t = 150$  °С,  $X = 0,7$ . Пар расширяется изотермически до давления 0,5 бар. Найти  $q$ , показать ход решения для нахождения работы. Представить процесс в PV, HS, TS - диаграммах.

Таблица I. Свойства водяного пара в состоянии насыщения:

| $t$ | $p$     | $v'$      | $v''$   | $h'$   | $h''$  | $r$    | $s'$   | $s''$  | $s''-s'$ |
|-----|---------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 150 | 0,47610 | 0,0010905 | 0,39250 | 632,25 | 2745,9 | 2113,7 | 1,8420 | 6,8370 | 4,9951   |

Таблица III. Свойства воды и водяного пара в однофазной области:

| $t$ | $p= 45$ кПа       |        |        | $p= 50$ кПа       |        |        | $p= 60$ кПа       |        |        | $p= 70$ кПа       |        |        |
|-----|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
|     | $t_{нас} = 78,71$ |        |        | $t_{нас} = 81,32$ |        |        | $t_{нас} = 85,93$ |        |        | $t_{нас} = 89,93$ |        |        |
|     | $v$               | $h$    | $s$    | $v$               | $h$    | $s$    | $v$               | $h$    | $s$    | $v$               | $h$    | $s$    |
| 150 | 4,3239            | 2780,6 | 7,9905 | 3,8899            | 2780,2 | 7,9412 | 3,2388            | 2779,5 | 7,8557 | 2,7738            | 2778,8 | 7,7833 |

#### Задание 4.2

Влажный воздух нагревается от температуры на входе в калорифер  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 70^\circ\text{C}$  - на выходе. Используя  $h-d$  диаграмму определить относительную влажность и удельную энтальпию влажного воздуха на выходе из калорифера, если температура мокрого термометра на входе  $t_m = 15^\circ\text{C}$ .

#### Задание 4.3

Водяной пар при давлении  $P_0=2,2$  МПа и температуре  $t_0=450^\circ\text{C}$  поступает к суживающим соплам. Давление за соплами  $P_{ср}= 0,2$  МПа. Определить скорость истечения пара. Изобразить процесс в диаграммах  $h,s$  и  $T,s$ . При решении некоторые величины можно округлить до табличных значений.

Для справки:  $\beta = \frac{P_{ср}}{P_0}$ ; Давление кризиса течения  $p_2 = p_0 \cdot \beta_{кр}$ ;  $\beta_{кр} = 0,546$

Таблица III. Свойства воды и водяного пара в однофазной области:

| $t$ | $p= 1,8$ МПа       |        |        | $p= 2,0$ МПа       |        |        | $p= 2,2$ МПа       |        |        | $p= 2,4$ МПа       |        |        |
|-----|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
|     | $t_{нас} = 207,12$ |        |        | $t_{нас} = 212,38$ |        |        | $t_{нас} = 217,26$ |        |        | $t_{нас} = 221,80$ |        |        |
|     | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    |
| 450 | 0,18208            | 3360,7 | 7,3377 | 0,16354            | 3358,1 | 7,2863 | 0,14836            | 3355,4 | 7,2396 | 0,13571            | 3352,7 | 7,1967 |
| $t$ | $p= 1,0$ МПа       |        |        | $p= 1,2$ МПа       |        |        | $p= 1,4$ МПа       |        |        | $p= 1,6$ МПа       |        |        |
|     | $t_{нас} = 179,89$ |        |        | $t_{нас} = 187,96$ |        |        | $t_{нас} = 195,05$ |        |        | $t_{нас} = 201,38$ |        |        |
|     | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    |
| 360 | 0,28734            | 3179,4 | 7,3366 | 0,23862            | 3175,6 | 7,2479 | 0,20382            | 3171,7 | 7,1722 | 0,17771            | 3167,8 | 7,1060 |
| 370 | 0,29217            | 3200,6 | 7,3699 | 0,24269            | 3197,0 | 7,2815 | 0,20733            | 3193,3 | 7,2061 | 0,18082            | 3189,6 | 7,1401 |
| 380 | 0,29699            | 3221,9 | 7,4026 | 0,24674            | 3218,4 | 7,3145 | 0,21084            | 3214,9 | 7,2394 | 0,18391            | 3211,3 | 7,1737 |

#### Задание 4.4

Определить мощность ГТУ с рабочим телом со свойствами воздуха, работающей по обыкновенному циклу Брайтона. С параметрами на входе в компрессор:  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 16^\circ\text{C}$ , степень повышения давления в компрессоре  $\beta = 8,47$ , температура на выходе из камеры сгорания  $t_3 = 1150^\circ\text{C}$ ; расход газа через турбину  $G = 500$  т/час.

| Воздух            |              |              |         |
|-------------------|--------------|--------------|---------|
| $t^\circ\text{C}$ | $h$ , кДж/кг | $u$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 16                | 289,67       | 207,57       | 1,2203  |
| 256               | 533,50       | 381,60       | 10,336  |
| 1150              | 1543,6       | 1135,1       | 483,27  |
| 566               | 865,57       | 624,69       | 57,05   |

#### Задание 4.5

Определить термический КПД ПТУ, работающей по обыкновенному циклу Ренкина. Параметры пара перед турбиной  $p_1 = 120$  бар и  $t_1 = 560^\circ\text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,04$  бар. Представить схему ПТУ и цикл в  $T-s$  и  $p-v$  координатах.

Таблица III. Свойства воды и водяного пара в однофазной области:

| $t$ | $p= 11,0$ МПа      |        |        | $p= 11,5$ МПа      |        |        | $p= 12,0$ МПа      |        |        | $p= 12,5$ МПа      |        |        |
|-----|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
|     | $t_{нас} = 318,08$ |        |        | $t_{нас} = 321,44$ |        |        | $t_{нас} = 324,68$ |        |        | $t_{нас} = 327,82$ |        |        |
|     | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    | $v$                | $h$    | $s$    |
| 560 | 0,032704           | 3517,2 | 6,7356 | 0,031180           | 3512,3 | 6,7106 | 0,029782           | 3507,4 | 6,6864 | 0,028497           | 3502,5 | 6,6630 |

Таблица II. Свойства водяного пара в состоянии насыщения:

| $p$    | $t$   | $v'$      | $v''$  | $h'$   | $h''$  | $r$    | $s'$   | $s''$  | $s''-s'$ |
|--------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 0,0040 | 28,96 | 0,0010041 | 34,792 | 121,40 | 2553,7 | 2432,3 | 0,4224 | 8,4735 | 8,0510   |

#### Задание 4.6

Рассчитать мощность газовой турбины, если на входе параметры рабочего тела  $p_1 = 4$  МПа и  $t_1 = 860$  °С, а на выходе  $p_2 = 1$  МПа. Внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{0i}^T = 0,91$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха, его расход 24 кг/с. Изобразить процесс на Ts – диаграмме.

| Воздух |              |         |
|--------|--------------|---------|
| $t$ °С | $h$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 860    | 1199,9       | 188,36  |
| 524    | 818,98       | 47,086  |
| 525    | 820,08       | 47,312  |

#### Задание 4.7

Определить температуру воздуха на выходе из турбины, если на входе параметры рабочего тела  $p_1 = 4$  МПа и  $t_1 = 860$  °С, а на выходе  $p_2 = 1$  МПа. Внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{0i}^T = 0,91$ . Изобразить процесс на Ts – диаграмме.

| Воздух |              |         |
|--------|--------------|---------|
| $t$ °С | $h$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 860    | 1199,9       | 188,36  |
| 524    | 818,98       | 47,086  |
| 525    | 820,08       | 47,312  |
| 532    | 852,11       | 35,417  |
| 533    | 853,23       | 35,583  |
| 534    | 854,36       | 35,751  |
| 535    | 855,48       | 35,919  |

#### Задание 4.8

Определить мощность воздушного компрессора, если на входе параметры рабочего тела  $p_1 = 100$  кПа и  $t_1 = 20$  °С, а на выходе  $p_2 = 620$  кПа. Внутренний относительный КПД компрессора  $\eta_{0i}^T = 0,86$ . Расход воздуха 2,4 кг/с. Изобразить процесс на Ts – диаграмме.

| Воздух |              |         |
|--------|--------------|---------|
| $t$ °С | $h$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 20     | 293,39       | 1,2784  |
| 218    | 494,08       | 7,8910  |
| 219    | 495,11       | 7,9487  |

#### Задание 4.19

Определить температуру воздуха на выходе из компрессора, если на входе параметры рабочего тела  $p_1 = 100$  кПа и  $t_1 = 20$  °С, а на выходе  $p_2 = 620$  кПа. Внутренний относительный КПД компрессора  $\eta_{0i}^T = 0,86$ . Изобразить процесс на  $Ts$  – диаграмме.

| Воздух   |              |         |
|----------|--------------|---------|
| $t$ , °С | $h$ , кДж/кг | $\pi_0$ |
| 20       | 293,39       | 1,2784  |
| 218      | 494,08       | 7,8910  |
| 219      | 495,11       | 7,9487  |
| 249      | 525,04       | 9,8308  |
| 250      | 527,08       | 9,8988  |
| 251      | 528,11       | 9,9681  |
| 252      | 529,15       | 10,035  |

#### Задание 4.10

Определить мощность дизельного двигателя с расходом топлива (дизельное топливо с теплотворной способностью  $44,8$  МДж/дм<sup>3</sup>) на номинальном режиме  $16$  дм<sup>3</sup>/час. Внутренний относительный КПД цикла  $0,78$ . Термический КПД  $0,54$ .

Пример выполнения задания

Воздух, массой  $1$  кг, при начальном абсолютном давлении  $2$  МПа и температуре  $360$  °С расширяется по адиабате до конечного давления  $1,16$  МПа. Определить техническую работу. Задачу решить с помощью таблиц.

Решение

1. По начальной температуре газа  $t_1 = 360$  °С по таблице термодинамических свойств находим:

относительное давление  $\pi_{01} = 19,881$

удельная энтальпия  $h_1 = 642,38$  кДж/кг

2. Относительное давление в конце адиабатного сжатия

$$\pi_{02} = 19,881 \cdot \frac{p_2}{p_1} = 19,881 \cdot \frac{1,16}{2,0} = 11,53$$

3. По термодинамическим таблицам по относительному давлению определяем параметры газа в конце процесса адиабатного сжатия

$$h_2 = 550,10 + \frac{11,53 - 11,51}{11,664 - 11,51} \cdot (552,17 - 550,10) = 550,37 \text{ кДж/кг}$$

4. Техническая работа

$$L = m \cdot l_{\text{тех}} = m \cdot (h_1 - h_2) = 1 \cdot (642,38 - 550,37) = 92,01 \text{ кДж.}$$

Ответ:  $L = 92,01$  кДж.

Воздух

Продолжение табл. 1

| $t, ^\circ\text{C}$ | $T, \text{K}$ | $h,$<br>$\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ | $u,$<br>$\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ | $p_0$  | $\theta_0$ | $s^0,$<br>$\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
|---------------------|---------------|---|---|--------|------------|---|
| 272                 | 545,15        | 550,10                                  | 393,60                                  | 11,510 | 11,312     | 7,4781  |
| 274                 | 547,15        | 552,17                                  | 395,11                                  | 11,664 | 11,204     | 7,4819  |
| 276                 | 549,15        | 554,25                                  | 396,61                                  | 11,819 | 11,098     | 7,4857  |
| 278                 | 551,15        | 556,33                                  | 398,12                                  | 11,976 | 10,992     | 7,4895  |
| 280                 | 553,15        | 558,41                                  | 399,63                                  | 12,134 | 10,888     | 7,4932  |
| 282                 | 555,15        | 560,49                                  | 401,13                                  | 12,294 | 10,786     | 7,4970  |
| 284                 | 557,15        | 562,58                                  | 402,64                                  | 12,455 | 10,684     | 7,5007  |
| 286                 | 559,15        | 564,66                                  | 404,15                                  | 12,618 | 10,584     | 7,5045  |
| 288                 | 561,15        | 566,74                                  | 405,66                                  | 12,783 | 10,485     | 7,5082  |
| 290                 | 563,15        | 568,83                                  | 407,17                                  | 12,949 | 10,387     | 7,5119  |
| 292                 | 565,15        | 570,91                                  | 408,68                                  | 13,117 | 10,291     | 7,5156  |
| 294                 | 567,15        | 573,00                                  | 410,19                                  | 13,286 | 10,196     | 7,5193  |
| 296                 | 569,15        | 575,09                                  | 411,71                                  | 13,458 | 10,101     | 7,5229  |
| 298                 | 571,15        | 577,18                                  | 413,22                                  | 13,630 | 10,008     | 7,5266  |
| 300                 | 573,15        | 579,27                                  | 414,74                                  | 13,805 | 9,9165     | 7,5303  |
| 302                 | 575,15        | 581,36                                  | 416,25                                  | 13,981 | 9,8256     | 7,5339  |
| 304                 | 577,15        | 583,45                                  | 417,77                                  | 14,159 | 9,7359     | 7,5375  |
| 306                 | 579,15        | 585,54                                  | 419,29                                  | 14,339 | 9,6473     | 7,5411  |
| 308                 | 581,15        | 587,63                                  | 420,81                                  | 14,520 | 9,5597     | 7,5448  |
| 310                 | 583,15        | 589,73                                  | 422,33                                  | 14,703 | 9,4732     | 7,5484  |
| 312                 | 585,15        | 591,82                                  | 423,85                                  | 14,888 | 9,3876     | 7,5519  |
| 314                 | 587,15        | 593,92                                  | 425,37                                  | 15,074 | 9,3031     | 7,5555  |
| 316                 | 589,15        | 596,01                                  | 426,89                                  | 15,263 | 9,2196     | 7,5591  |
| 318                 | 591,15        | 598,11                                  | 428,42                                  | 15,453 | 9,1371     | 7,5626  |
| 320                 | 593,15        | 600,21                                  | 429,94                                  | 15,645 | 9,0555     | 7,5662  |
| 322                 | 595,15        | 602,31                                  | 431,47                                  | 15,839 | 8,9749     | 7,5697  |
| 324                 | 597,15        | 604,41                                  | 432,99                                  | 16,034 | 8,8952     | 7,5732  |
| 326                 | 599,15        | 606,51                                  | 434,52                                  | 16,232 | 8,8164     | 7,5767  |
| 328                 | 601,15        | 608,61                                  | 436,05                                  | 16,431 | 8,7386     | 7,5803  |
| 330                 | 603,15        | 610,72                                  | 437,58                                  | 16,632 | 8,6616     | 7,5837  |
| 332                 | 605,15        | 612,82                                  | 439,11                                  | 16,835 | 8,5855     | 7,5872  |
| 334                 | 607,15        | 614,93                                  | 440,64                                  | 17,040 | 8,5103     | 7,5907  |
| 336                 | 609,15        | 617,03                                  | 442,17                                  | 17,247 | 8,4360     | 7,5942  |
| 338                 | 611,15        | 619,14                                  | 443,70                                  | 17,456 | 8,3625     | 7,5976  |
| 340                 | 613,15        | 621,25                                  | 445,24                                  | 17,666 | 8,2898     | 7,6011  |
| 342                 | 615,15        | 623,35                                  | 446,77                                  | 17,879 | 8,2180     | 7,6045  |
| 344                 | 617,15        | 625,46                                  | 448,31                                  | 18,093 | 8,1469     | 7,6079  |
| 346                 | 619,15        | 627,57                                  | 449,84                                  | 18,310 | 8,0767     | 7,6113  |
| 348                 | 621,15        | 629,69                                  | 451,38                                  | 18,528 | 8,0072     | 7,6147  |
| 350                 | 623,15        | 631,80                                  | 452,92                                  | 18,749 | 7,9386     | 7,6181  |
| 352                 | 625,15        | 633,91                                  | 454,46                                  | 18,971 | 7,8706     | 7,6215  |
| 354                 | 627,15        | 636,03                                  | 456,00                                  | 19,196 | 7,8035     | 7,6249  |
| 356                 | 629,15        | 638,14                                  | 457,54                                  | 19,422 | 7,7371     | 7,6283  |
| 358                 | 631,15        | 640,26                                  | 459,08                                  | 19,651 | 7,6714     | 7,6316  |
| 360                 | 633,15        | 642,38                                  | 460,62                                  | 19,881 | 7,6064     | 7,6350  |
| ---                 | ---           | ---                                     | ---                                     | ---    | ---        | ---   |

## Банк заданий по специальной части вступительного испытания в магистратуру

### Задание экзаменационного билета №5 (10 баллов)

#### Задание 5.1

Расчет теплового потока в плоской одно- и многослойной стенке в стационарных условиях при граничных условиях I рода в отсутствие внутренних источников теплоты.

#### Задание 5.2

Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое, ее модернизированный вариант (двухслойная схема).

#### Задание 5.3

Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе, результаты исследований для жидкостей и газов, расчетные формулы.

#### Задание 5.4

«Кривая кипения». Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме.

#### Задание 5.5

Основные законы теплового излучения.

#### Задание 5.6

Гидродинамика и теплообмен при поперечном обтекании одиночного кругового цилиндра.

#### Задание 5.7

Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности.

#### Задание 5.8

Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины (система уравнений теплового пограничного слоя, соотношения для расчета теплообмена).

#### Задание 5.9

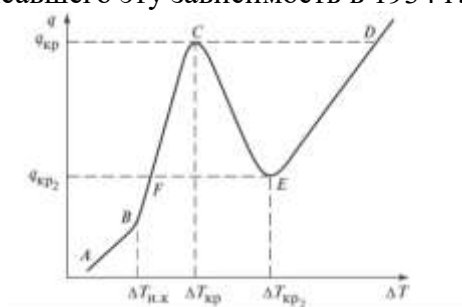
Теплообмен при пленочной конденсации: анализ допущений к задаче Нуссельта, рекомендации по расчету.

#### Задание 5.10

Подобие физических процессов. Физический смысл чисел подобия конвективного тепло- и массообмена.

#### Пример выполнения задания 5.4

Зависимость  $q(\Delta T)$  называют **кривой кипения** или кривой Нукияма по имени японского исследователя, впервые описавшего эту зависимость в 1934 г.



$\Delta T = T_c - T_s$  – перегрев стенки,  $T_c$  – температура стенки,  $T_s$  – температура насыщения.

**AB** – свободная конвекция,  $\Delta T < \Delta T_{н.к.}$  (начала кипения)

**BC** – пузырьковое кипение,  $q \sim \Delta T^3$  (для технических поверхностей нагрева).

По мере увеличения тепловой нагрузки изменяется структура двухфазной смеси: от режима изолированных пузырьков до режима сросшихся пузырьков (паровых конгломератов).

Принципиальной особенностью пузырькового кипения является то, что на всем его протяжении абсолютно преобладающая часть твердой поверхности нагрева покрыта жидкостью. Суммарная доля площади сухих пятен (центров парообразования) даже при самых больших тепловых потоках не превосходит 10 %.

**CD** – кризис кипения (пузырькового),  $q = q_{кр}$

Небольшое увеличение  $q$  в окрестности  $q_{кр}$  приводит к резкому росту площади сухих пятен и образованию сплошной паровой пленки на обогреваемой поверхности (переход от пузырькового кипения к пленочному).

**DE** – пленочное кипение

В пленочном режиме  $T_c$  превышает температуру спинодали, что исключает возможность ее прямого контакта с жидкостью; тепло передается к межфазной поверхности через паровую пленку путем теплопроводности и однофазной конвекции в паре, а также излучением.

**EF** – кризис пленочного кипения,  $q = q_{кр2}$

**CE** – переходное кипение

Данный режим можно получить, если в эксперименте управлять  $T_c$ . Этому процессу отвечает «неестественная» отрицательная зависимость  $q(\Delta T)$ , когда с ростом перегрева стенки тепловой поток снижается.

Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме.

Формула В.В. Ягова для расчета теплообмена при пузырьковом кипении в большом объеме:

$$q = 3,43 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda^2 \Delta T^3}{\nu \sigma T_s} \left( 1 + \frac{h_{LG} \Delta T}{2 R_i T_s^2} \right) (1 + \sqrt{1 + 800B} + 400B)$$

где безразмерный параметр

$$B = \frac{h_{LG} (\rho'' \nu)^{3/2}}{\sigma (\lambda T_s)^{1/2}}$$

$h_{LG}$  – теплота испарения,  $\lambda$  – теплопроводность жидкости,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $R_i$  – индивидуальная газовая постоянная,  $\rho''$  – плотность пара.

## Задание экзаменационного билета №6 (10 баллов)

### Задание 6.1

Оценить среднюю температуру поверхности металлической кровли в солнечный день при следующих условиях: плотность теплового потока, падающего на крышу, 200 Вт/м<sup>2</sup>, температура воздуха 20 °С, скорость ветра 5 м/с, длина крыши в направлении ветра 40 м; все воспринимаемое кровлей тепло отдается движущемуся у поверхности воздуху. Свойства воздуха: кинематическая вязкость 15,1·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с, теплопроводность 2,6·10<sup>-2</sup> Вт/(м·К), число Прандтля 0,7.

### Задание 6.2

Вода с температурой 30°С поступает в трубу с внутренним диаметром 10 мм и длиной 2 м. Расход воды 0,15 кг/с, ее среднемассовая температура на выходе 50°С. Определить температуру внутренней поверхности трубы на выходе, считая плотность теплового потока постоянной по длине трубы. Свойства воды: плотность 992 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 4200 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,635 Вт/(м·К), кинематическая вязкость 0,659·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с, число Прандтля 4,31.

### Задание 6.3

Воздушный поток со скоростью 2 м/с и температурой 20 °С обдувает электропровод диаметром 4 мм под углом атаки 45°. Найти коэффициент теплоотдачи и силу тока в проводе, если удельное электросопротивление провода  $0,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, а температура на поверхности 80 °С. Свойства воздуха: теплопроводность 0,0283 Вт/(м·К), кинематическая вязкость  $18 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, число Прандтля 0,7.

### Задание 6.4

Опытный участок для исследования теплоотдачи при переменной плотности теплового потока на стенке представляет собой круглую трубу внутренним диаметром  $d = 10$  мм. Участок охлаждается водой при давлении  $p = 10^5$  Па,  $T_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ . Расход воды  $G = 100$  кг/ч. Определить температуру воды в сечении, отстоящем от входа на 1 м, если плотность теплового потока изменяется вдоль трубы по линейному закону:  $q_c = (0,3 + 3,0x) \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Изобарная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг·К).

### Задание 6.5

Воздух при атмосферном давлении обтекает плоскую пластину длиной 4 м. Температура воздуха 70°С, скорость воздуха 30 м/с. Рассчитать локальный коэффициент теплоотдачи на задней кромке пластины. Свойства воздуха: кинематическая вязкость  $20 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, теплопроводность  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), число Прандтля 0,7.

### Задание 6.6

Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации сухого насыщенного пара атмосферного давления на наружной поверхности вертикальной трубы диаметром 28 мм и длиной 0.7 м при температуре стенки 70 °С. Сколько конденсата будет образовываться за 1 ч? Влияние переменности свойств не учитывать. Температура насыщения 100 °С, плотность пара 0.598 кг/м<sup>3</sup>, свойства конденсата: плотность 958 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $2.94 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, теплопроводность 0.677 Вт/(м·К), теплота фазового перехода 2260 кДж/кг.

### Задание 6.7

Плоские стальные стенки ( $\delta=15$  мм,  $\lambda=30$  Вт/(м·К)) сушильной камеры, внутри которой поддерживается температура 140 °С, необходимо изолировать слоем шлаковой ваты так, чтобы температура наружной поверхности составляла 40 °С. Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стен камеры 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К), с наружной поверхности слоя изоляции к окружающему воздуху (20 °С) - 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить толщину слоя ваты, если для нее  $\lambda_{\text{в}}=0,05$  Вт/(м·К).

### Задание 6.8

Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации сухого насыщенного пара атмосферного давления на наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром 12 мм и длиной 1 м при температуре стенки 90 °С. Определить удельную нагрузку конденсатора (сколько конденсата образуется на 1 м<sup>2</sup> поверхности за 1 с). Влияние переменности свойств не учитывать. Температура насыщения 100 °С, плотность пара 0.598 кг/м<sup>3</sup>, свойства конденсата: плотность 958 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $2.94 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, теплопроводность 0.677 Вт/(м·К), теплота фазового перехода 2260 кДж/кг.

### Задание 6.9

Электрошина прямоугольного сечения 150×2 мм расположена на ребре и охлаждается свободным потоком воздуха с температурой 20 °С. В условиях длительной нагрузки температура шины не должна превышать 60 °С. Вычислить допустимую силу тока в шине для указанных условий. Удельное сопротивление материала шины 0,13 Ом·мм<sup>2</sup>/м. Свойства

воздуха: плотность  $1,128 \text{ кг/м}^3$ , изобарная теплоемкость  $1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , теплопроводность  $0,0276 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , кинематическая вязкость  $16,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , число Прандтля  $0,7$ .

#### Задание 6.10

Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации сухого насыщенного пара атмосферного давления на наружной поверхности вертикальной трубы диаметром  $12 \text{ мм}$  и длиной  $3 \text{ м}$  при температуре стенки  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Влияние переменности свойств не учитывать. Температура насыщения  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность пара  $0,598 \text{ кг/м}^3$ , свойства конденсата: плотность  $958 \text{ кг/м}^3$ , кинематическая вязкость  $2,94 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , теплопроводность  $0,677 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , число Прандтля  $1,75$ , теплота фазового перехода  $2260 \text{ кДж/кг}$ .

#### Пример выполнения задания 6.4

Дано:  $d=10 \text{ мм}=0,01 \text{ м}$ ,  $p = 10^5 \text{ Па}$ ,  $T_{\text{вх}}=20^\circ\text{C}$ ,  $L=1 \text{ м}$ ,  $q_c = (0,3 + 3,0x) \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ ,  
 $G=100 \text{ кг/ч}=0,028 \text{ кг/с}$ ,  $c_p=4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$

Найти:  $\bar{T}(L)$ -?

Решение:

В соответствии с уравнением теплового баланса

$$\bar{T}(L) = T_{\text{вх}} + \frac{\pi d}{G c_p} \int_0^L q_c(x) dx = T_{\text{вх}} + \frac{\pi d}{G c_p} 1,8 \cdot 10^5 = 68 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ:  $68 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Задание экзаменационного билета №7 (10 баллов)

##### Задание 7.1

Определить плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной  $5 \text{ мм}$ , если температуры поверхностей равны  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопроводность стенки  $16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Найти температуру в середине стенки.

##### Задание 7.2

Определить плотность теплового потока через латунную стенку толщиной  $3 \text{ мм}$ , перепад температур в которой составляет  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какой должна быть толщина медной стенки, чтобы при перепаде температур  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  плотность теплового потока не изменилась? Теплопроводность латуни  $100 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , теплопроводность меди  $370 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

##### Задание 7.3

Определить тепловой поток через стену из кирпича высотой  $2,5 \text{ м}$ , шириной  $3 \text{ м}$  и толщиной  $250 \text{ мм}$ , если температуры поверхностей стены равны  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопроводность кирпича  $0,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

##### Задание 7.4

Определить теплопроводность плоской стенки, если плотность теплового потока составляет  $300 \text{ Вт/м}^2$ , а перепад температур между ее поверхностями  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Толщина стенки  $100 \text{ мм}$ .

##### Задание 7.5

Определить плотность теплового потока через стекло, если температуры его поверхностей равны  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , а толщина составляет  $5 \text{ мм}$ . Свойства стекла: плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ , изобарная теплоемкость  $670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , температуропроводность  $4,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

##### Задание 7.6

Рассчитать теплопроводность плоской стенки, если плотность теплового потока составляет  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , а перепад температур между ее поверхностями  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Толщина стенки  $250 \text{ мм}$ .

### Задание 7.7

По каналу внутренним диаметром 20 мм длиной 1 м с расходом 120 кг/час протекает вода при давлении  $p = 0.1$  МПа с температурой на входе  $20$  °С. Плотность теплового потока равна  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Определите температуру воды на выходе из трубы. Изобарная теплоемкость воды  $4200$  Дж/(кг·К).

### Задание 7.8

Определить линейную плотность теплового потока через стенку трубы внешним диаметром 37 мм и толщиной 2.5 мм, изготовленную из стали с теплопроводностью  $15$  Вт/(м·К). Температура внутренней поверхности  $400$  °С, внешней поверхности  $600$  °С.

### Задание 7.9

Определить линейную плотность теплового потока через стенку трубы внешним диаметром 25 мм и толщиной 1.5 мм, изготовленную из стали с теплопроводностью  $16$  Вт/(м·К). Температура внутренней поверхности  $300$  °С, внешней поверхности  $350$  °С.

### Задание 7.10

В трубе диаметром  $0.02$  м с расходом  $0.05$  кг/с протекает вода при атмосферном давлении. Температура на входе  $20$  °С, плотность теплового потока  $1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Определите температуру воды в сечении, расположенном на расстоянии  $1.5$  м от входа в трубу. Изобарная теплоемкость воды  $4200$  Дж/(кг·К).

### Пример выполнения задания 7.4

Дано:  $q=300$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\Delta T=25$  °С,  $\delta=100$  мм= $0,1$  м.

Найти:  $\lambda$  -?

Решение:

Плотность теплового потока через плоскую стенку:  $q = \frac{\lambda \Delta T}{\delta}$ . Тогда

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta T} = \frac{300 \cdot 0,1}{25} = 1,2 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Ответ:  $1,2$  Вт/(м·К).

## Задание экзаменационного билета №8 (10 баллов)

### Задание 8.1

Найти результирующую плотность потока теплового излучения между двумя черными бесконечными параллельными пластинами с температурами  $1000$  °С и  $500$  °С.

### Задание 8.2

Найти результирующую плотность потока теплового излучения между двумя серыми бесконечными параллельными пластинами. Для первой пластины: температура  $1000$  °С, степень черноты  $0,5$ . Для второй пластины: температура  $500$  °С, степень черноты  $0,25$ .

### Задание 8.3

Вычислите плотность потока теплового излучения на поверхности Солнца, если температура там равна  $5780$  К.

### Задание 8.4

Во сколько раз увеличится плотность потока излучения черного тела, если его температура вырастет с  $300$  °С до  $600$  °С?

### Задание 8.5

Каким приближением – Вина или Рэля-Джинса – можно пользоваться для излучения черного тела с температурой 1000 К на длине волны 0,65 мкм?

### Задание 8.6

Как изменится длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной плотности потока излучения черного тела, если температура тела понизится с 200 °С до 100 °С?

### Задание 8.7

Шар радиуса  $r$  находится внутри сферической полости радиуса  $R$ ; центр шара совпадает с центром полости. Найдите все угловые коэффициенты излучения в этой системе.

### Задание 8.8

На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности потока излучения черного тела, если его температура равна 25 °С?

### Задание 8.9

Длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности потока излучения черного тела при некоторой температуре, равна 10 мкм. Чему равна частота, соответствующая максимуму спектральной плотности потока излучения черного тела при этой температуре?

### Задание 8.10

В координатах  $(\lambda, \lambda)$  изобразите на одном графике кривые, соответствующие трем законам спектрального распределения интенсивности излучения: Планка, Вина, Рэля–Джинса.

### Пример выполнения задания 8.4

Дано:  $T_1=300$  °С,  $T_2=600$  °С

Найти:  $E_0^{(2)}/E_0^{(1)}$  -?

Решение:

В соответствии с законом Стефана-Больцмана для плотности потока излучения черного тела  $E_0 = \sigma T^4$ , где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – константа Стефана-Больцмана. Тогда

$$\frac{E_0^{(2)}}{E_0^{(1)}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \left(\frac{600+273,15}{300+273,15}\right)^4 = 5,39.$$

Ответ: в 5,39 раза.

## Задание экзаменационного билета №9 (10 баллов)

### Задание 9.1

Коэффициент теплоотдачи для описания теплообмена при ламинарной свободной конвекции у вертикальной плоскости при граничных условиях первого рода зависит от вертикальной координаты  $x$ :

1.  $\alpha_x \sim x^{-1/4}$
2.  $\alpha_x \sim x^{1/4}$
3.  $\alpha_x \sim x^{3/4}$
4.  $\alpha_x \neq \alpha_x(x)$

### Задание 9.2

Число Грасгофа при граничных условиях первого рода определяется как

1.  $Gr = \frac{g\beta\Delta T x^3}{\nu^2}$
2.  $Gr = \frac{g\beta q x^4}{\nu^2 \lambda}$
3.  $Gr = \frac{g\beta\Delta T x^3}{\nu a}$
4.  $Gr = \frac{g\beta q x^4}{\nu a \lambda}$

#### Задание 9.3

Какому из перечисленных ниже процессов соответствует отрицательная зависимость  $q(\Delta T)$ , когда с ростом перегрева стенки тепловой поток снижается?

1. пузырьковое кипение
2. пленочное кипение
3. переходное кипение
4. свободная конвекция

#### Задание 9.4

Как зависит локальный коэффициент теплоотдачи от продольной координаты при ламинарном обтекании плоской пластины?

1.  $\sim x^{1/2}$
2.  $\sim x^{-1/2}$
3.  $\sim x^{1/3}$
4.  $\sim x^{-1/3}$

#### Задание 9.5

Коэффициент теплоотдачи для описания теплообмена при турбулентной свободной конвекции у вертикальной плоскости при граничных условиях первого рода зависит от вертикальной координаты  $x$ :

1.  $\alpha_x \sim x^{-1/4}$
2.  $\alpha_x \sim x^{1/4}$
3.  $\alpha_x \sim x^{3/4}$
4.  $\alpha_x \neq \alpha_x(x)$

#### Задание 9.6

В каких пределах изменяется угловой коэффициент излучения?

1. от 0 до 1
2. от 1 до бесконечности
3. от 0 до бесконечности
4. от -1 до 1

#### Задание 9.7

Критическое значение числа Рейнольдса при переходе от ламинарного к турбулентному режиму при внешнем обтекании плоской пластины составляет:

1.  $3 \cdot 10^5$
2. 2300
3. 2100
4. 1600

#### Задание 9.8

Какой режим течения установится на расстоянии 0.01 м от переднего края пластины, обтекаемой потоком воздуха со скоростью 15 м/с? Кинематическая вязкость воздуха  $15 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

1. ламинарный
2. турбулентный
3. смешанный
4. недостаточно входных данных для определения

#### Задание 9.9

Какие законы следуют из формулы Планка?

1. Вина
2. Кирхгофа
3. Рэлея-Джинса
4. Стефана-Больцмана

#### Задание 9.10

Какой режим течения установится на расстоянии 1 м от переднего края пластины, обтекаемой потоком воздуха со скоростью 15 м/с? Кинематическая вязкость воздуха  $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

1. ламинарный
2. турбулентный
3. смешанный
4. недостаточно входных данных для определения

#### Пример выполнения задания 9.4

Как зависит локальный коэффициент теплоотдачи от продольной координаты при ламинарном обтекании плоской пластины?

1.  $\sim x^{1/2}$
2.  $\sim x^{-1/2}$
3.  $\sim x^{1/3}$
4.  $\sim x^{-1/3}$

Ответ: 2.

#### Задание экзаменационного билета №10 (10 баллов)

##### Задание 10.1

Какое из перечисленных чисел подобия характеризует отношение конвективного потока энергии к молекулярному?

1. число Пекле
2. число Рейнольдса
3. число Фруда
4. число Прандтля

##### Задание 10.2

Как зависит локальный коэффициент теплоотдачи от продольной координаты при турбулентном обтекании плоской пластины?

1.  $\sim x^{1/2}$
2.  $\sim x^{-1/2}$
3.  $\sim x^{1/5}$
4.  $\sim x^{-1/5}$

### Задание 10.3

Как зависит коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации неподвижного пара на горизонтальной трубе от ее диаметра  $D$  при граничных условиях первого рода?

1.  $\sim D^{1/4}$
2.  $\sim D^{-1/4}$
3.  $\sim D^{-1/3}$
4. не зависит

### Задание 10.4

Какое из следующих допущений не использовалось Нуссельтом при анализе теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной плоскости?

1. Теплофизические свойства жидкости считаются постоянными
2. Течение пленки конденсата турбулентное
3. Не учитывается конвективный перенос импульса
4. Не учитывается конвективный перенос энергии

### Задание 10.5

Какое число подобия характеризует отношение сил инерции и сил вязкости?

1. число Нуссельта
2. число Грасгофа
3. число Рейнольдса
4. число Пекле

### Задание 10.6

В условиях начального термического участка при ламинарном течении в трубе при граничных условиях первого рода безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) можно рассчитать по соотношению:

1.  $Nu = 1,03 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$
2.  $Nu = 1,31 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$
3.  $Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$
4.  $Nu = \frac{Re Pr \frac{\xi}{8}}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)}$

### Задание 10.7

При турбулентном течении в трубе безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) можно рассчитать по соотношению:

1.  $Nu = 1,03 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$
2.  $Nu = 1,31 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$
3.  $Nu = 0,332 Re^{1/2} Pr^{1/3}$
4.  $Nu = \frac{Re Pr \frac{\xi}{8}}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)}$

### Задание 10.8

Число Грасгофа при граничных условиях второго рода определяется как

1.  $Gr = \frac{g \beta \Delta T x^3}{\nu^2}$

$$2. Gr = \frac{g\beta qx^4}{v^2\lambda}$$

$$3. Gr = \frac{g\beta\Delta T x^3}{va}$$

$$4. Gr = \frac{g\beta qx^4}{va\lambda}$$

#### Задание 10.9

В условиях начального термического участка при ламинарном течении в трубе при граничных условиях второго рода безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) можно рассчитать по соотношению:

$$1. Nu = 1,03 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$$

$$2. Nu = 1,31 \left( \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3}$$

$$3. Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$4. Nu = \frac{Re Pr \frac{\xi}{8}}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)}$$

#### Задание 10.10

Как зависит толщина динамического пограничного слоя от продольной координаты при ламинарном обтекании плоской пластины?

1.  $\sim x^{1/2}$
2.  $\sim x^{-1/2}$
3.  $\sim x^{4/5}$
4.  $\sim x^{-4/5}$

#### Пример выполнения задания 10.4

Какое из следующих допущений не использовалось Нуссельтом при анализе теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной плоскости?

1. Теплофизические свойства жидкости считаются постоянными
2. Течение пленки конденсата турбулентное
3. Не учитывается конвективный перенос импульса
4. Не учитывается конвективный перенос энергии

Ответ: 2.