

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

М.М.Соколов

## **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ, ТЕПЛОТЕХНИКИ И АЭРОДИНАМИКИ**

Учебно-методическое пособие  
по подготовке к лекционным и практическим занятиям по дисциплине «Основы гидрав-  
лики, теплотехники и аэродинамики» для обучающихся по направлению подготовки  
08.02.08 Монтаж и эксплуатация оборудования и систем газоснабжения.

Нижний Новгород  
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

М.М.Соколов

## **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ, ТЕПЛОТЕХНИКИ И АЭРОДИНАМИКИ**

Учебно-методическое пособие  
по подготовке к лекционным и практическим занятиям по дисциплине «Основы гидрав-  
лики, теплотехники и аэродинамики» для обучающихся по направлению подготовки  
08.02.08 Монтаж и эксплуатация оборудования и систем газоснабжения.

Нижний Новгород  
ННГАСУ  
2022

УДК 621.1.016

Соколов М.М. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. [Электронный ресурс]: учеб.- метод. пос. / М.М. Соколов; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун - т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. – 50 с; ил. 1 электрон. опт. диск (CD-RW)

В настоящем учебно-методическом пособии по дисциплине «Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики» даются конкретные рекомендации учащимся для освоения, как основного, так и дополнительного материала дисциплины, способствующие достижению целей, обозначенных в учебной программе дисциплины. Цель учебно-методического пособия — это помощь в подготовке к лекционным и практическим занятиям.

Предназначено обучающимся в ННГАСУ студентам среднего профессионального образования для подготовки к лекционным и практическим занятиям по дисциплине «Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики» по направлению подготовки 08.02.08 Монтаж и эксплуатация оборудования и систем газоснабжения.

© М.М. Соколов, 2022  
© ННГАСУ, 2022.

## Оглавление

1. Общие положения .....	4
1.1 Цели изучения дисциплины и результаты обучения .....	4
1.2 Содержание дисциплины .....	4
1.3 Порядок освоения материала.....	6
2. Методические указания по подготовке к лекциям.....	7
2.1 Общие рекомендации по работе на лекциях .....	7
2.2 Общие рекомендации при работе с конспектом лекций.....	7
2.3 Общие рекомендации по изучению материала лекций и их теоретический базис .....	7
3. Методические указания по подготовке к практическим занятиям.....	35
3.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям .....	35
4. Методические указания по организации самостоятельной работы .....	41
4.1 Общие рекомендации для самостоятельной работы .....	41
4.2 Пример тестового задания для проверки знаний.....	46
Литература .....	49

## **1. Общие положения**

### **1.1 Цели изучения дисциплины и результаты обучения**

Целями освоения учебной дисциплины ОП.06 Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики являются: приобретение теоретических знаний и практических навыков в области теплотехники, гидравлики и аэродинамики.

В процессе освоения дисциплины студент должен

Знать:

- начала термодинамики
- основные термодинамические законы,
- особенности построения термодинамических циклов,
- особенности выполнения теплотехнического расчета,
- особенности выполнения гидравлического расчета,
- основные критерии подобия,
- практические аспекты рассматриваемых фундаментальных дисциплин.

Уметь:

- выполнять общий теплотехнический и гидравлический расчет,
- работать с I-d диаграммой влажного воздуха,
- строить термодинамические циклы.

Учебная дисциплина ОП.06 Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики относится к общепрофессиональному циклу основной профессиональной образовательной программы среднего профессионального образования по специальности 08.02.08 Монтаж и эксплуатация оборудования и систем газоснабжения.

### **1.2 Содержание дисциплины**

Материал дисциплины сгруппирован по следующим разделам:

#### **Раздел 1. Термодинамика как наука**

##### **Лекционные занятия**

**Тема 1.1. Термические параметры состояния.**

Основные термины и определения. Начала термодинамики и следствия из них. Объем, давление, температура. Определения, размерности, примеры применения.

**Тема 1.2. Идеальный газ.**

Определение. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Уравнения Шарля, Бойля-Мариотта, Гей-Люссака.

**Тема 1.3. Базовые термодинамические процессы.**

Изотермический, изохорный, изобарный процессы. Определения и особенности построения в различных системах координат.

**Тема 1.4. Энергия, работа, энтальпия, энтропия, теплоемкость.**

Основные термины и определения.

**Тема 1.5. Адиабатный и политропный процессы. Основные циклы.** Определения и особенности построения в различных системах координат. Циклы: Карно, Брайтона, Отто, Дизеля, Тринклера, Ренкина.

**Практические занятия.**

Особенности построения термодинамических циклов. Решение задач.

**Раздел 2. Гидравлика как наука****Лекционные занятия****Тема 2.1. Гидростатика как раздел гидравлики.**

Основные термины и определения. Основные математические зависимости.

**Тема 2.2. Гидродинамика как раздел гидравлики.**

Основные термины и определения. Основные математические зависимости.

**Тема 2.3. Режимы течения жидкости. Потери в линейных и местных сопротивлениях.** Основные термины и определения. Основные математические зависимости. Примеры.

**Тема 2.4. Гидравлика в инженерных задачах**

Особенности расчета трубопроводов и инженерного оборудования на примере кожухотрубных теплообменников. Основные математические зависимости. Примеры.

**Практические занятия.**

Опыт Рейнольдса. Ламинарное и турбулентное течение. Решение задач.

### **Раздел 3. Теплофизика как наука**

#### **Лекционные занятия**

**Тема 3.1. Теплофизика.** Основные термины и определения. Способы теплообмена. Теплопроводность. Уравнение Фурье.

**Тема 3.2. Излучение и конвекция.** Основные термины и определения. Уравнение Стефана-Больцмана. Краткие сведения о теории подобия.

**Тема 3.3. Основы теплоотдачи.** Основные термины и определения. Факторы, влияющие на теплоотдачу.

**Тема 3.4. Теплофизика в инженерных задачах.** Определение сопротивления теплопередачи наружных ограждающих конструкций. Построение температурного графика внутри стены.

#### **Практические занятия.**

Основные параметры I-d диаграммы влажного воздуха. Построения на i-d диаграмме. Определение температуры точки росы в помещении. Графический и аналитический методы определения параметров микроклимата влажного воздуха.

### **1.3 Порядок освоения материала**

На освоение материала студентам выделяется 36 часов, из которых лекционных занятий - 30 часов и практических занятий - 6 часов. Промежуточная аттестация проходит в форме дифференцированного зачета.

## **2. Методические указания по подготовке к лекциям**

### **2.1 Общие рекомендации по работе на лекциях**

Лекция – это важнейшее звено дидактического цикла обучения, цель которой - формирование основы для последующего усвоения учебного материала. В ходе лекции преподаватель в устной форме, а также с помощью презентаций передает обучаемым знания по основным, фундаментальным вопросам изучаемой дисциплины.

Назначение лекции состоит в доходчивом изложении основных положений изучаемой дисциплины и ориентации на наиболее ее важные вопросы.

Большие возможности для реализации образовательных и воспитательных целей предоставляет личное общение на лекции преподавателя со студентами.

При подготовке к лекционным занятиям студенты должны ознакомиться с презентацией, предлагаемой преподавателем, отметить непонятные термины и положения, подготовить вопросы с целью уточнения правильности понимания. Рекомендуется приходить на лекцию подготовленным, так как в этом случае лекция может быть проведена в интерактивном режиме, что способствует повышению эффективности лекционных занятий.

### **2.2 Общие рекомендации при работе с конспектом лекций**

В ходе лекционных занятий необходимо вести конспектирование учебного материала. Он помогает внимательно слушать и лучше запоминать в процессе осмысленного записывания. Также конспект незаменим, как опорный материал при подготовке к семинару, зачету, экзамену.

В случае неясности по тем или иным вопросам необходимо задавать преподавателю уточняющие вопросы. Следует ясно понимать, что отсутствие вопросов без обсуждения означает в большинстве случаев неувоенность материала дисциплины.

### **2.3 Общие рекомендации по изучению материала лекций и их теоретической базис**

Теплотехника – наука, занимающаяся исследованием методов использования химической энергии топлива, изучением законов преобразования этой энергии в тепловую и механическую, а также изучением веществ, участвующих в этих преобразованиях (топливо, вода, водяной пар и т.д.).

Условно теплотехнику подразделяют на 3 раздела:

1. Техническая термодинамика и рабочие процессы тепловых двигателей.



2. Теория теплопередачи.
3. Инженерное оборудование.

Также в данном курсе затрагивается гидравлика и аэродинамика.

### 2.3.1 Раздел 1. Термодинамика как наука

#### *Введение. Термины и определения. Основные законы.*

Термодинамика изучает особенности преобразования энергии и опирается на 4 постулата (начало термодинамики)

#### **0 начало термодинамики**

Замкнутая система независимо от своего начального состояния в конце концов приходит к состоянию термодинамическому равновесию (покоя) и самостоятельно выйти из нег не может.

*Следствие из 0 начала:* вводится само понятие термодинамическая система «и одно из ее важнейших характеристик (оценок) – температура.

Термодинамическая система – замкнутая и достаточно обширная в области числа Авогадро ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ), в которых собираются статистические закономерности (движение молекул, нагрев и охлаждение тел).

**Первый закон (начало) термодинамики** – это закон сохранения энергии. Энергия не возникает самопроизвольно и не исчезает бесследно, а лишь переходит из одного вида в другой.

*Следствие из 1-го закона:* невозможно создать вечный двигатель 1-го рода (КПД > 100%)

**Второй закон (начало) термодинамики.** Теплота не передается самопроизвольно от менее нагретого тела к более нагретому.

*Следствие из 2-го закона:* невозможно создать вечный двигатель 2-го рода (КПД=100%)

**Третий закон термодинамики.** Невозможно достичь абсолютного нуля температуры в любом конечном процессе, связанном с изменением энтропии, а можно к нему лишь асимптотически приблизиться.

*Следствие из 3-го закона:* Абсолютный ноль по Кельвину – это  $-273,15^\circ\text{C}$  недостижим в термодинамических системах, так как при этом прекращается любое тепловое движение.

Температура, объём и давление называются термический параметр состояния.

Техническое определение. Температура – это степень нагретости тела.

Физическое определение. Температура – мера кинетической энергии движения молекул.

$$t[k] \quad t_c = \frac{5}{9} \cdot (t_F - 32); \quad t_F = \frac{9}{5} \cdot (t_c + 32) \quad (1)$$

Исторически сложилось, что благодаря более точной шкале Вильяма Томсона (Лорда Кельвина), все расчеты фундаментальных дисциплин, в том числе в технической термодинамики производятся в Кельвинах. Температура стала одной из фундаментальных величин, имеющих неделимую размерность (её невозможно выразить через другие размерности – всего таких величин семь: масса (кг), время (с), длина (м), сила тока (А), температура (К), сила света (кд), количество вещества (моль)).

Давление – это сила (совокупность сил), приложенных к площади поверхности.

$$P[\text{Па}] = \frac{H}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \mathcal{M}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}}$$

Объем – величина, характеризующая пространство заменяем термодинамической

системой.  $v = \frac{V}{m} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]$   $v$  – удельная величина

$$\rho = \frac{1}{v} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \quad (2)$$

Эти параметры связывают так называемые термические уравнения состояний, которые представляли ранее 3 газовых закона.

1) Закон - Бойля-Мариотта

$$PV = \text{const} \quad T = \text{const} \quad (3)$$

Если произведение давления и объема является постоянной величиной, то и  $T$  является постоянной величиной.

2) Закон Гей-Люссака

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad p = \text{const} \quad (4)$$

При постоянстве отношений объемов и температур – постоянство давления.

3) закон Шарля

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad V = \text{const} \quad (5)$$

При постоянстве отношение давлений и температур постоянный объем.

В настоящее время все 3 уравнения объединяются в более универсальном уравнении

Менделеева – Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} R_{\mu} T, \quad (6)$$

где  $R_{\mu}$  – универсальная газовая постоянная (вывод при нормальных условиях)

При нормальных условиях:  $T=273\text{К}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ );  $p=760$  мм.рт.ст. ( $101325$  Па);  $V=22,4$  м<sup>3</sup>

$$R_{\mu} = \frac{pV}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4}{273} = 8313,8 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона позволяет работать с идеальными газами - это способность частиц, представляющих собой математические точки (не имеющие объема) где все взаимодействие сводится к соударению (сила притяжения и взаимного отталкивания отсутствует).

### Основные термические процессы.

Изотермический процесс, проходящий при постоянной температуре, изобарный процесс, проходящий при постоянном давлении, изохорический процесс, проходящий при постоянном объеме - являются тремя базовыми процессами термодинамики.

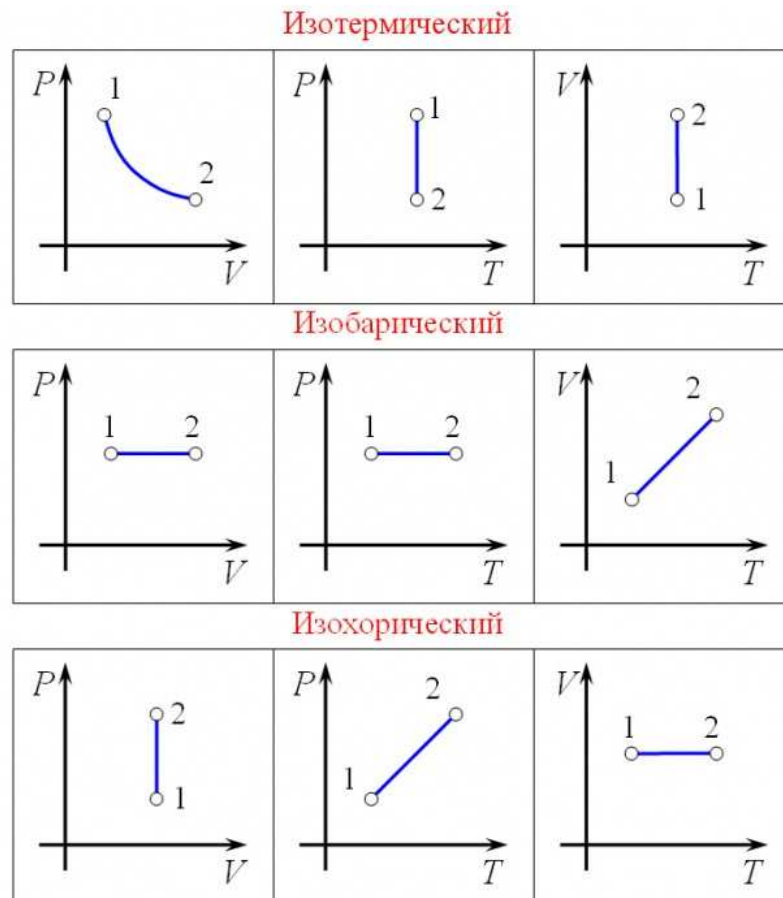


Рис 1. Особенности отображения термических процессов.

*Энергия. Работа. Теплота. Энтальпия. Теплоемкость. Энтропия*

Пожалуй, самая известная форма записи энергии:

$$E = m * c^2 \quad (7)$$

$c = 3 * 10^8$  м/с- скорость света,  $m$  – масса тел, кг

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}} \quad (8)$$

$m_0$  - покоящегося тела

$W$ - скорость, с которой движется тело

$$E = \frac{m_0 * c^2}{\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}} \quad (9)$$

$E = m_0 * c^2$ - энергия покоящегося тела  $E \neq 0, W_0 = 0$ ;

$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{W^2}{c^2}}}$ , при  $\frac{W^2}{c^2} \approx \frac{W^2}{2c^2}$  малых скоростях

$$E = m_0 * c^2 + \frac{1}{2} * m_0 * W^2 = \text{из (9)} = E_0 + \frac{m_0 * W^2}{2}$$

Таким образом, полная энергия микросистемы будет определяться по формуле:

$$E = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} + U \quad (10)$$

Под всей энергией понимают меру движения материи. Полная энергия микросистемы включает в себя кинетическую энергию системы во внешних силовых полях и внутреннюю энергию системы (все границы термодинамические эти 3 энергии).

Энергия может передаваться посредством теплоты или работы.

Работа это воздействие сил давления при изменении объема системы

$$L = \int_1^2 p dV = p * \Delta V_{1-2} \quad (11)$$

В данном уравнении, величина  $p$  рассматривается как обобщенная сила или потенциал, разность которой у среды и системы вызывает процесс, а величину  $V$  как обобщенную координату, то есть величину, изменяющуюся под влиянием этого потенциала. Работа сил давления в элементарном процессе равна произведению обобщенной силы на дифференциал обобщенной координаты.

Количество теплоты определяется как произведение теплоемкости вещества на элементарную разность температур.

$$dQ = m * c * dt \quad (12)$$

Теплоемкостью называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить температуру какой-либо его количественной единицы на 1°C. В базовом представлении теплоемкость подразделяется на массовую, мольную и объемную. По-

сколькx количество теплоты, сообщаемое единице количества газа, происходит при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$ , то такую теплоемкость от  $t_1$  до  $t_2$  называют средней:

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

$q$  - изменение теплоты

Когда предел отношения между разностью температур стремится к 0 (приращение  $\Delta t$  бесконечно малое), такое значение теплоемкости называют истинным:

$$c = \frac{dq}{dt} \quad (14)$$

Каждая из представленных теплоемкостей может быть средней и абсолютной (6 вариантов). Поскольку для газов существует нагрев и охлаждение, опираясь на ранее пройденные термические параметры, особо важные процессы происходят или при постоянном давлении  $P$  или постоянном объеме.

Поэтому выделяют изохорную и изобарную теплоемкости. Таким образом, все теплоемкости можно представить следующим образом:

$\mu * C_v$ ,  $\mu * C_{vm}$ ,  $\mu * C_0$ ,  $\mu * C_{pm}$  – мольные

$C_v$ ,  $C_{vm}$ ,  $C_p$ ,  $C_{pm}$  – массовые

$C_v$ ,  $C_{vm}$ ,  $C_p$ ,  $C_{pm}$  – объемные

Самое простое определение Энтальпии - теплосодержание. Это тепловая функция термодинамической системы, которая по-другому называется энергией расширенной системы, и определяется как сумма внутренней энергии газа и потенциальной энергии сил давления.

$$I = H = E = U + pV \quad (15)$$

Энтропия - это функция термодинамической системы, характеризующая необратимое рассеивание энергии.

### ***Адиабатный и политропный процессы. Термодинамические циклы.***

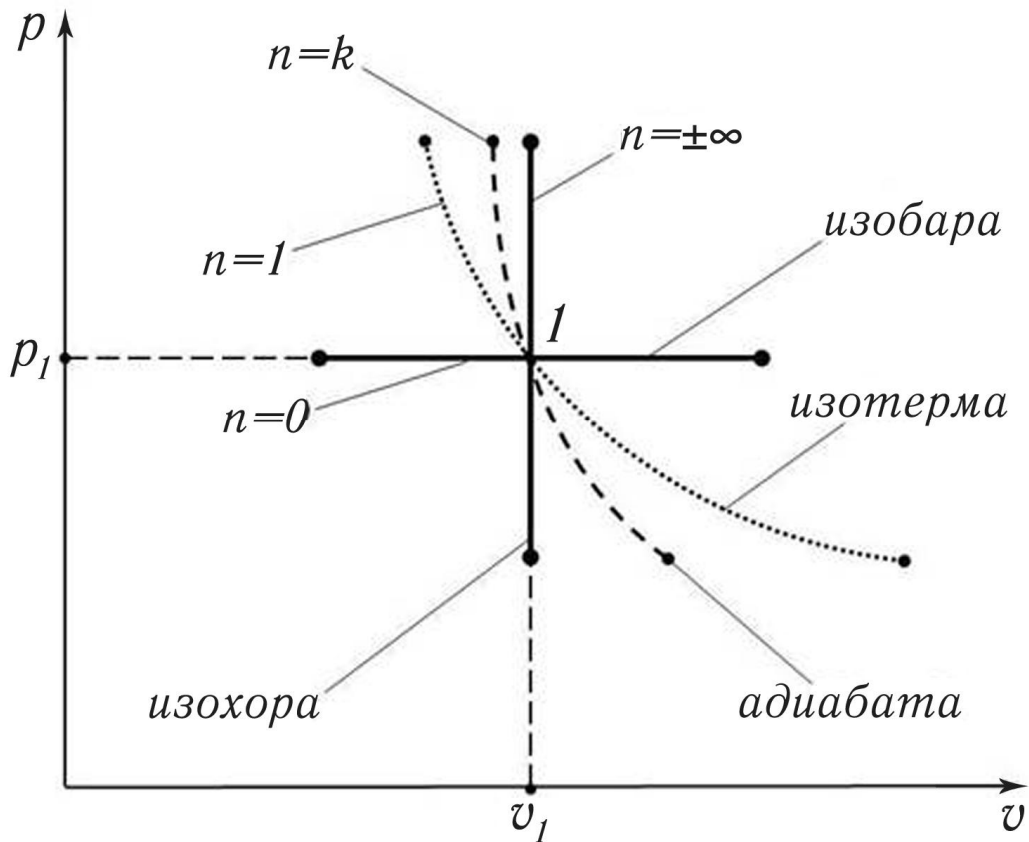
Все вышеописанные физические величины необходимы для понимания двух более сложных процессов адиабатного и политропного.

При адиабатном процессе система не обменивается тепловой энергией с окружающей средой. Адиабатический процесс является частным случаем политропного процесса, так как при нём теплоёмкость газа равна нулю и, следовательно, постоянна.

Адиабатические процессы обратимы только тогда, когда в каждый момент времени система остаётся равновесной (например, изменение состояния происходит достаточно медленно) и изменения энтропии не происходит.

Политропный процесс — термодинамический процесс, во время которого теплоёмкость газа остаётся неизменной. По сути, все вышеописанные процессы явля-

ются частными случаями политропного процесса (рис. 2). Все зависит от того, какое значение примет показатель политропы  $n$ .



№	Наименование процесса	Условие (свойство) процесса	Вид условия политропы $pv^n = \text{const}$	Значение $n$
1	Изобарный	$p = \text{const}$	$pv^0 = \text{const}$	$n = 0$
2	Изотермический	$T = \text{const}$	$pv^1 = \text{const}$	$n = 1$
3	Изохорный	$v = \text{const}$	$pv^\infty = \text{const}$	$n = \pm\infty$
4	Адиабатный	$q = 0; pv^k = \text{const}$	$pv^k = \text{const}$	$n = k$

Рис 2. Особенности отображения термических процессов.

Важно отметить, что показатель адиабаты  $k$  или в литературе можно встретить название коэффициент Пуассона, определяется как отношение изобарной и изохорной теплоемкостей, в то время как для показателя политропы  $n$  также важно знать реальную теплоемкость газа ( $C$ ) в данном процессе.

$$k = \frac{C_p}{C_v}; n = \frac{C - C_p}{C - C_v} \quad (16)$$

Все вышеописанные процессы превращения теплоты в работу и процессы превращения работы в теплоту, реализуются в тепловых машинах. А круговые процессы в термодинамике, то есть такие процессы, в которых совпадают начальные и конечные пара-

метры, определяющие состояние рабочего тела (давление, объем и т.д.) принято называть термодинамическими циклами. В данной работе приведем лишь самые известные.

Без сомнения самым известным термодинамическим циклом является цикл Сади Карно – идеальный круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.

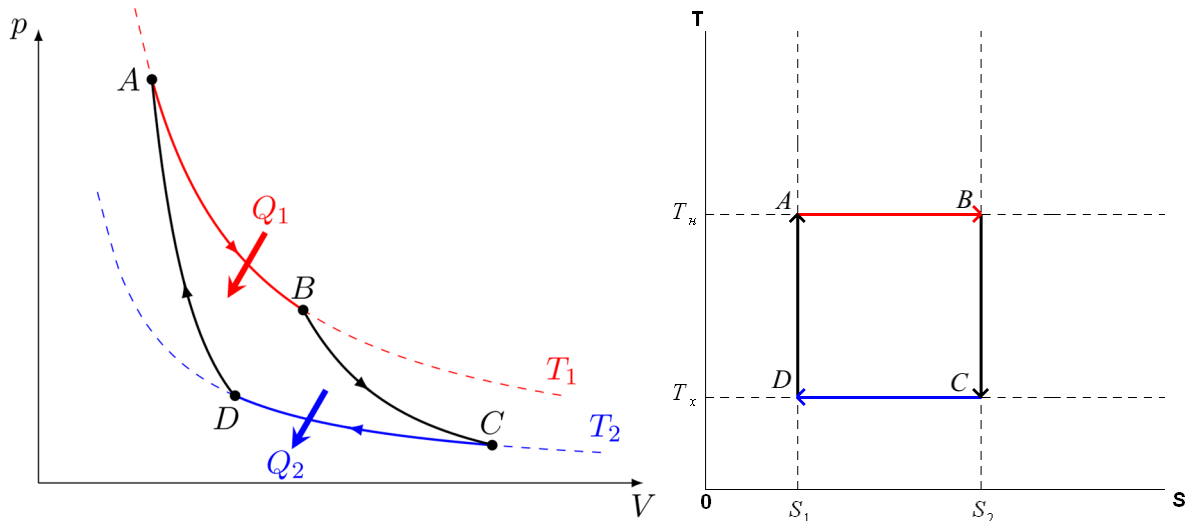


Рис 3. Цикл Карно. АВ – изотерма; ВС – адиабата; CD – изотерма; DA – адиабата.

Стоит отметить, что в 1824 году французский физик и военный инженер Никола Леонар Сади Карно (1796 - 1832) опубликовал свою работу "Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу", в которой им были сформулированы основные положения теории тепловых машин и впервые предложено второе начало термодинамики. Но только в 1834 году, после придания Бенуа Клапейроном этой теории доступной математической формы, идеи Карно получили широкое распространение для обоснования второго начала термодинамики. По обратному циклу Карно работают холодильные машины.

Циклы двигателей внутреннего сгорания носят имена своих создателей, без первоначальной компрессии с искровым разрядом (современный бензиновый) – Николауса Отто, с первоначальной компрессией воздуха и без искрового разряда (современный дизельный) – Рудольфа Дизеля (рис. 4). Для цикла Отто характерны следующие процессы: 1—2 адиабатное сжатие рабочего тела; 2—3 изохорный подвод теплоты к рабочему телу; 3—4 адиабатное расширение рабочего тела; 4—1 изохорное охлаждение рабочего тела. Цикл Дизеля: 1—2 адиабатное сжатие рабочего тела; 2—3 изобарный подвод теплоты к рабочему телу; 3—4 адиабатное расширение рабочего тела; 4—1 изохорное охлаждение рабочего тела.

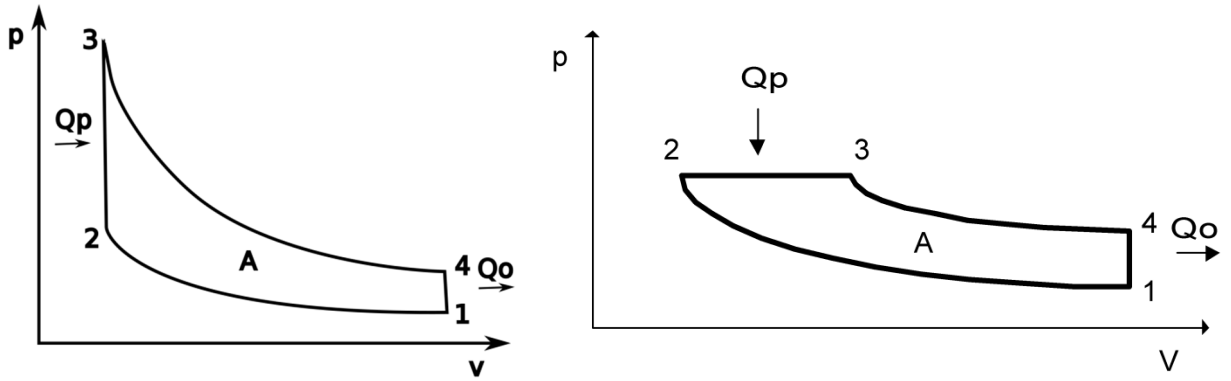


Рис 4. Слева цикл Отто, справа цикл Дизеля.

Нельзя не отметить цикл Густава Тринклера, который объединяет в себе циклы Отто и Дизеля, а сам Тринклер в свое время был одним из главных конкурентов Дизеля в создании двигателя внутреннего сгорания будущего. Цикл Тринклера состоит из следующих процессов: 1—2 В рабочем цилиндре воздух адиабатически сжимается за счет инерции маховика, сидящего на валу двигателя, нагреваясь при этом до температуры, обеспечивающей воспламенение топливно-воздушной смеси; 2—3 Сгорание части топлива в небольшом объеме форкамеры ( $V=\text{const}$ ); 3—4 Догорание оставшегося топлива в рабочем цилиндре ( $P=\text{const}$ ); 4—5 Адиабатическое расширение продуктов сгорания; 5—1 Удаление выхлопных газов ( $V=\text{const}$ ).

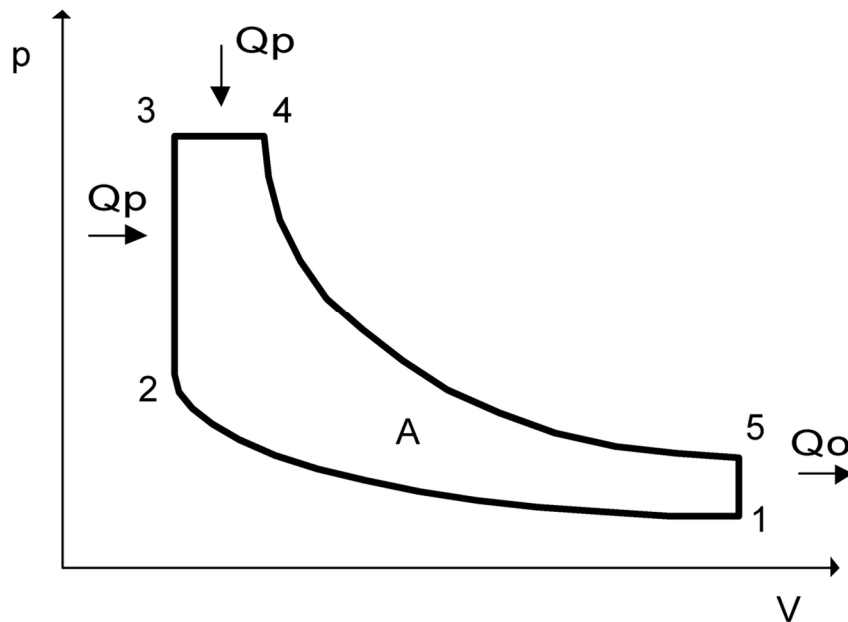


Рис 5. Цикл Тринклера.

Цикл Джорджа Брайтона описывает рабочие процессы газотурбинного, турбореактивного и прямоточного воздушно-реактивных двигателей внутреннего сгорания, а также газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела. В него входят: 1—2 Изоэнтропическое сжатие;



2—3 Изобарическое расширение (подвод теплоты); 3—4 Изоэнтропическое расширение.  
4—1 Изобарическое сжатие (отвод теплоты).

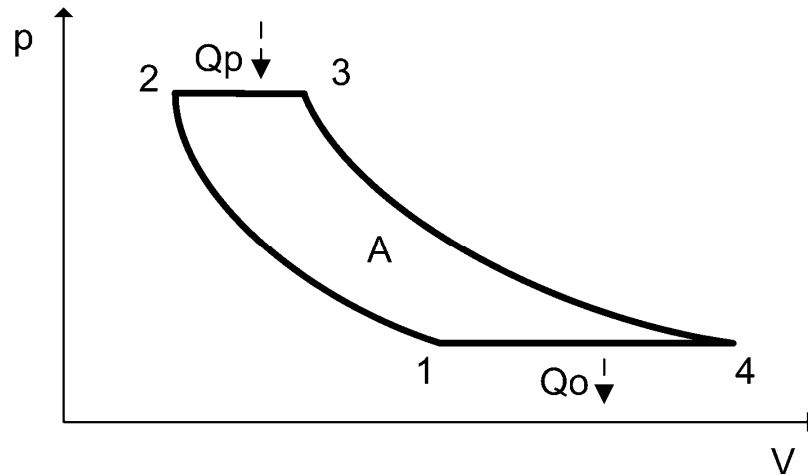


Рис 6. Цикл Брайтона.

Конечно, описывая тепловые двигатели нельзя не упомянуть о цикле, происходящем в паровых турбинах – цикле Уильяма Ренкина. Но он наиболее сложный из всех вышеперечисленных процессов, поскольку во время него происходит фазовый переход. Цикл Ренкина включает в себя следующие процессы: изобара (термодинамика) — линия 4—5—6—1. Происходит нагрев и испарение воды, а затем перегрев пара. В этом процессе затрачивается теплота; адиабата — линия 1—2. Процесс расширения пара в турбине и преобразования части внутренней энергии пара в механическую работу; изобара — линия 2—3 конденсация отработавшего пара с отводом теплоты в конденсатор охлаждающей конденсатор водой. адиабата — линия 3—4. Сжатие сконденсировавшейся воды до первоначального давления в парогенераторе с затратой работы.

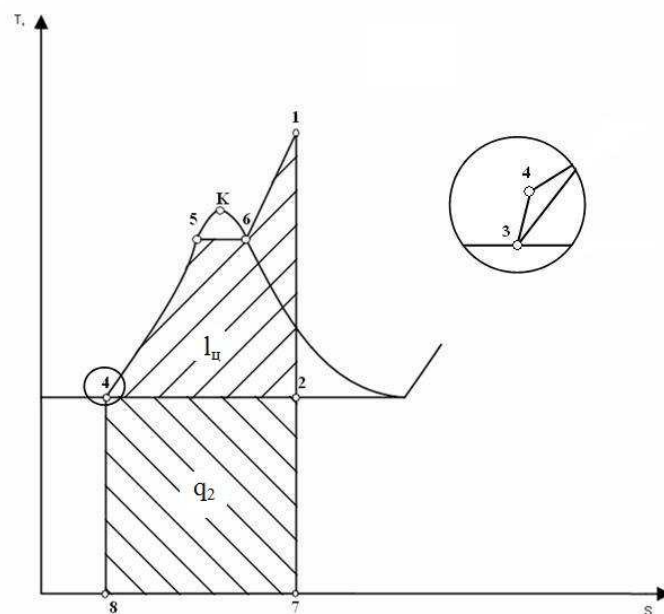


Рис 7. Цикл Ренкина.

Наиболее наглядно этот цикл выглядит на  $h-s$  диаграмме, а поскольку в качестве рабочего тела здесь используется вода в двух агрегатных состояниях, независимо от выбранной системы координат на графике отображается критическая точка  $K$  и слева от точки кривая кипящей жидкости, а справа кривая сухого пара (рис 7).

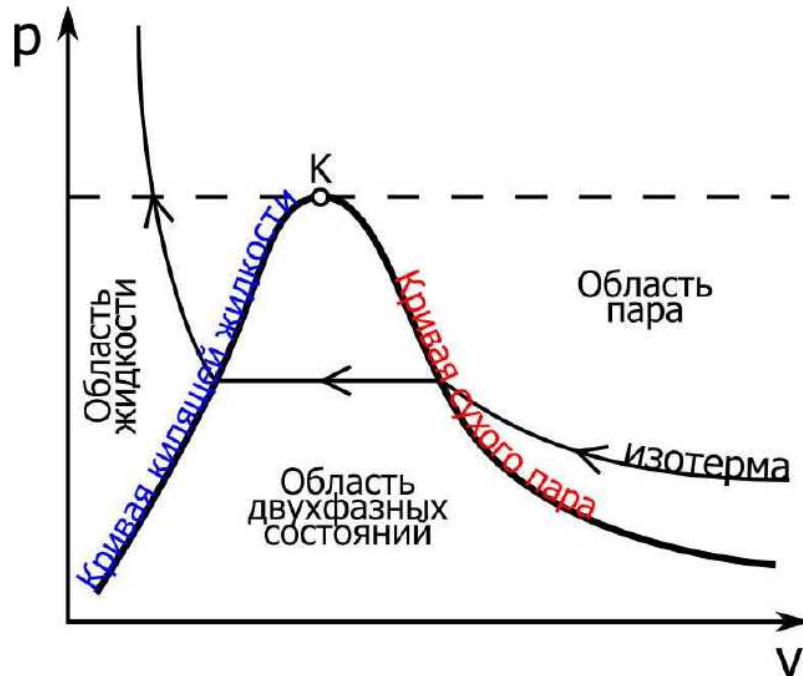


Рис. 8. Отображение кривой кипящей жидкости и кривой сухого пара в  $p-v$  координатах.

### 2.3.2 Раздел 2. Гидравлика как наука

Гидравлика представляет собой теоретическую дисциплину, изучающую вопросы, связанные с механическим движением жидкости в различных природных и техногенных условиях. Поскольку жидкость (и газ) рассматриваются как непрерывные и неделимые физические тела, то гидравлику часто рассматривают как один из разделов механики так называемых сплошных сред, к каковым принято относить и особое физическое тело - жидкость. По этой причине гидравлику часто называют механикой жидкости или гидромеханикой; предметом её исследований являются основные законы равновесия и движения жидкостей и газов. Как в классической механике в гидравлике можно выделить общепринятые составные части: гидростатику, изучающую законы равновесия жидкости; кинематику, описывающую основные элементы движущейся жидкости и гидродинамику, изучающую основные законы движения жидкости и раскрывающую причины её движения.

*Гидростатика как раздел гидравлики.*

Гидростатика – это раздел гидравлики (механики жидкости), изучающий покоящиеся жидкости. Она изучает законы равновесия жидкости и распределения в ней давления. Основные величины, используемые в гидростатике, – это давление  $p$  и напор  $H$ .

В гидравлике при изучении законов равновесия и движения широко пользуются различными физическими характеристиками жидкости (например, плотность, вязкость, удельный вес, удельный объём). Студенту нужно уметь определять основные физические характеристики жидкости, знать единицы этих характеристик. Следует также рассмотреть основные физические свойства капельных жидкостей: сжимаемость, тепловое расширение и др.

Существуют следующие физические свойства жидкости:

1) Плотность  $\rho$  – это масса единицы объёма жидкости ( $\text{кг/м}^3$ ):

$$\rho = m/V, \quad (17)$$

где  $m$  – масса, кг;

$V$  – объём,  $\text{м}^3$ .

Плотность воды при температуре  $+4^\circ\text{C}$  равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Легко заметить, что плотность воды зависит от температуры незначительно. В большинстве гидравлических расчётов свойствами сжимаемости и температурного расширения жидкостей пренебрегают, например, для воды считают плотность постоянной и равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

2) Удельный вес – это вес единицы объёма жидкости ( $\text{Н/м}^3$ ):

$$\gamma = G/V, \quad (18)$$

где  $G$  – вес (сила тяжести),  $\text{Н}$ ;

$V$  – объём,  $\text{м}^3$ .

Связаны удельный вес и плотность через ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \approx 10 \text{ м/с}^2$ ) так:

$$\gamma = \rho g \quad (19)$$

3) Коэффициент объёмного сжатия  $\beta_W$  ( $\text{Па}^{-1}$ ) – это относительное изменение объёма жидкости при изменении давления на единицу:

$$\beta_W = -\frac{\Delta W}{W \cdot \Delta p} = \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \Delta p} \quad (20)$$

где  $\Delta W$  – изменение объёма  $W$ ;

$\Delta p$  – изменение плотности  $\rho$ , соответствующее изменению давления на величину  $\Delta p$ .

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия, называется модулем упругости жидкостей  $E_{\text{ж}}$  ( $\text{Па}$ ):

$$E_{ж} = 1/\beta_W \quad (21)$$

Значение модуля упругости жидкостей зависит от давления и температуры. Если принять, что приращение давления  $\Delta p = p - p_0$ , а изменение объёма  $\Delta W = W - W_0$ , то:

$$W = W_0 \cdot (1 - \beta_W \cdot \Delta p), \quad (22)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \beta_W \cdot \Delta p). \quad (23)$$

4) Коэффициент температурного расширения  $\beta_t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>-1</sup> выражает относительное изменение объёма жидкости при изменении температуры на один градус:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta t}, \quad (24)$$

где  $\Delta W$  – изменение объёма  $W$ , соответствующее изменению температуры на величину  $\Delta t$ .

Коэффициент температурного расширения воды увеличивается с возрастанием температуры и давления; для большинства других капельных жидкостей  $\Delta t$  с увеличением давления уменьшается. Если принять, что приращение температуры  $\Delta t = t - t_0$ , а изменение объёма  $\Delta W = W - W_0$ , то:

$$W = W_0 (1 + \beta_t \cdot \Delta t), \quad (25)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_t \cdot \Delta t). \quad (26)$$

5) Вязкость – это свойство жидкости проявлять внутреннее трение при её движении, обусловленное сопротивлением взаимному сдвигу её частиц. В покоящейся жидкости вязкость не проявляется. Количественно вязкость может быть выражена в виде динамической или кинематической вязкости, которые легко переводятся одна в другую.

Вязкость динамическая  $\mu$ , Па · с = Н · с/м<sup>2</sup>. Динамический коэффициент вязкости  $\mu$  не зависит от давления и от характера движения, а определяется лишь физическими свойствами жидкости и её температурой.

В практике для характеристики вязкости жидкости чаще применяют не коэффициент динамической вязкости, а коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  (м<sup>2</sup>/с). Коэффициентом кинематической вязкости называется отношение коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\text{Вязкость кинематическая } \nu = \mu/\rho, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Стоит также отметить важную величину для гидростатики – гидростатическое давление  $p$ . Это скалярная величина, характеризующая напряжённое состояние жидкости.

Давление в системе СИ измеряется в паскалях: Па = Н/м<sup>2</sup>.

Связь единиц давления в различных системах измерения такая:

$$100\,000 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

Два свойства гидростатического давления:

1. Давление в покоящейся жидкости на контакте с твёрдым телом вызывает напряжения, направленные перпендикулярно к поверхности раздела.
2. Давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям. Это свойство отражает скалярность давления.

Основное уравнение гидростатики гласит, что полное давление в жидкости  $p$  равно сумме внешнего давления на жидкость  $p_0$  и давления веса столба жидкости  $p_ж$ , то есть

$$p = p_0 + p_ж = p_0 + \gamma h, \quad (27)$$

где  $h$  – высота столба жидкости над точкой (глубина её погружения), в которой определяется давление.

Из уравнения следует, что давление в жидкости увеличивается с глубиной и зависимость является линейной.

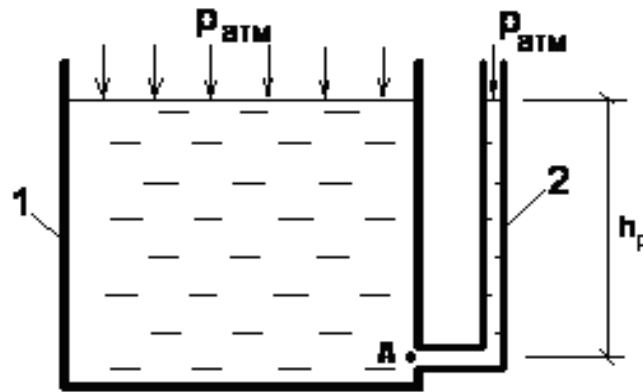


Рис. 9. К выведению основного уравнения гидростатики.

### *Гидродинамика как раздел гидравлики.*

Это раздел гидромеханики, в котором изучаются движение несжимаемых жидкостей и взаимодействие их с твёрдыми телами. Методами Гидродинамики можно исследовать также движение газов, если скорость этого движения значительно меньше скорости звука в рассматриваемом газе. При скорости движения газа, близкой к скорости звука или превышающей её, начинает играть заметную роль сжимаемость газа и методы Гидродинамики уже неприменимы. Такое движение газа исследуется в газовой динамике.

При решении той или иной задачи в Гидродинамике применяют основные законы и методы механики и, учитывая общие свойства жидкостей, получают решение, позволяющее определить скорость, давление и касательную напряжения в любой точке занятого жидкостью пространства. Это даёт возможность рассчитать, в частности, и силы взаимодействия между жидкостью и твёрдым телом. Главными свойствами жидкости, с точки

зрения Гидродинамики, являются её лёгкая подвижность, или текучесть, выражающаяся в малом сопротивлении жидкости деформациям сдвига, и сплошность (в Гидродинамике жидкость считается непрерывной однородной средой); кроме того принимается, что жидкости не сопротивляются растяжению.

Основные уравнения Гидродинамики получаются путём применения общих законов физики к элементарной массе, выделенной в жидкости, с последующим переходом к пределу при стремлении к нулю объёма, занимаемого этой массой. Одно из уравнений, называемое уравнением неразрывности, получается путём применения к элементу, выделенному в жидкости, закона сохранения массы: другое уравнение (или в проекциях на оси координат - три уравнения) получается в результате применения к элементу жидкости закона о количестве движения, согласно которому изменение количества движения элемента должно совпадать по величине и направлению с импульсом силы, приложенной к нему. Решение общих уравнений Гидродинамики исключительно сложно и может быть доведено до конца не всегда, а только в небольшом числе частных случаев. Поэтому приходится упрощать задачи путём отбрасывания в уравнениях членов, которые в данных условиях имеют менее существенные значение для определения характера течения. Например, в ряде случаев можно с достаточной для практики точностью описать реально наблюдаемое течение, пренебрегая вязкостью жидкости; таким образом, приходят к теории идеальной жидкости, которую можно применять для решения многих гидродинамических задач. В случае движения жидкостей с весьма большой вязкостью (густые масла и т.п.) величина скорости течения изменяется незначительно и можно пренебречь ускорением.

В Гидродинамике идеальной жидкости особенно важное значение имеет Бернулли уравнение, согласно которому вдоль струйки жидкости имеет место следующее соотношение между давлением  $p$ , скоростью  $v$  течения жидкости (с плотностью  $\rho$ ) и высотой  $h$  над плоскостью отсчёта  $p + 1/2\rho v^2 + \rho gh = \text{const.}$  ( $g$  - ускорение свободного падения). Это уравнение является основным в гидравлике. Это соотношение получено для достаточно узкой трубки тока и, строго говоря, справедливо, когда трубка тока переходит в линию тока. Оно хорошо выполняется для реальных жидкостей, обладающих малым внутренним трением.

Это уравнение описывает стационарное течение несжимаемой жидкости (иногда употребляют термин "идеальной жидкости"), и играет фундаментальную роль в гидродинамических исследованиях. Если нам известно давление  $p_1$ , скорость  $v_1$  в некотором сечении трубки тока, находящемся на высоте  $h_1$ , то в любом другом сечении на высоте  $h$  величины  $p$  и  $v$  связаны соотношением

$$\rho \cdot v^2 / 2 + p + \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot v_1^2 / 2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 \quad (28)$$

Рассмотрим более подробно физический смысл входящих в уравнение Бернулли членов. Так, статическое давление  $p$  численно равно работе сил давления, совершаемых над единичным объемом жидкости; динамическое давление  $\rho v^2/2$  есть кинетическая энергия единицы объема, а величина  $\rho gh$  является потенциальной энергией единичного объема в поле силы тяжести

Давление  $p$  - это статическое давление, которое получит манометр, находящийся в жидкости и движущийся вместе с нею,  $\rho v^2/2$  - это динамическое давление, смысл которого будет раскрыт позднее. Заметим, что в покоящейся жидкости предыдущее равенство описывает гидростатическое распределение давлений.

### ***Режимы течения жидкости. Потери в линейных и местных сопротивлениях.***

Течение вязкой жидкости по трубам в зависимости от ряда условий может быть ламинарным (или слоистым) и турбулентным (или вихревым). В случае ламинарного течения все молекулы жидкости движутся параллельно оси трубы и, находясь на одинаковом расстоянии от осевого центра трубы, имеют равные скорости.

Для турбулентного движения характерно наличие нормальной (перпендикулярной направлению течения жидкости) составляющей скорости движения молекул и резкий спад скорости течения при приближении к границам. Траектория движения молекул представляет собой сложную кривую линию.

Режим жидкости определяется числом или критерием Рейнольдса, который представляет собой отношение скорости потока жидкости, характерного размера и плотности жидкости к динамической вязкости (также может быть записан через кинематическую вязкость).

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (29)$$

В общей гидравлике (в различных прикладных дисциплинах эти значения могут варьироваться) ламинарное течение определяется критерием Рейнольдса менее 2320, турбулентное более 10000. От 2320 до 10000 принято считать переходным режимом или неустойчивым турбулентным.

При ламинарном течении частицы жидкости в форме отдельных несмешивающихся струй, следуют очертаниям канала или стенам и профиль скоростей на достаточном удалении от канала труб, имеют вид правильной параболы.

Турбулентный режим движения характеризуется непостоянством скорости движения частиц жидкости в рассматриваемой точке пространства. Из-за непрерывного перемешивания жидкости в ней нельзя выделить отдельные струи, а такое движение лишь

условно можно назвать стационарным, считая для каждой точки жидкости характерные не мгновенные, а усредненные за некоторый промежуток времени значения скорости. В этом случае профиль скоростей по сечению трубы будет иметь вид усеченной параболы и максимальная скорость, наблюдаемая у частиц жидкости, движущихся по оси трубы, будет в 1,2 – 1,3 раза больше средней скорости.

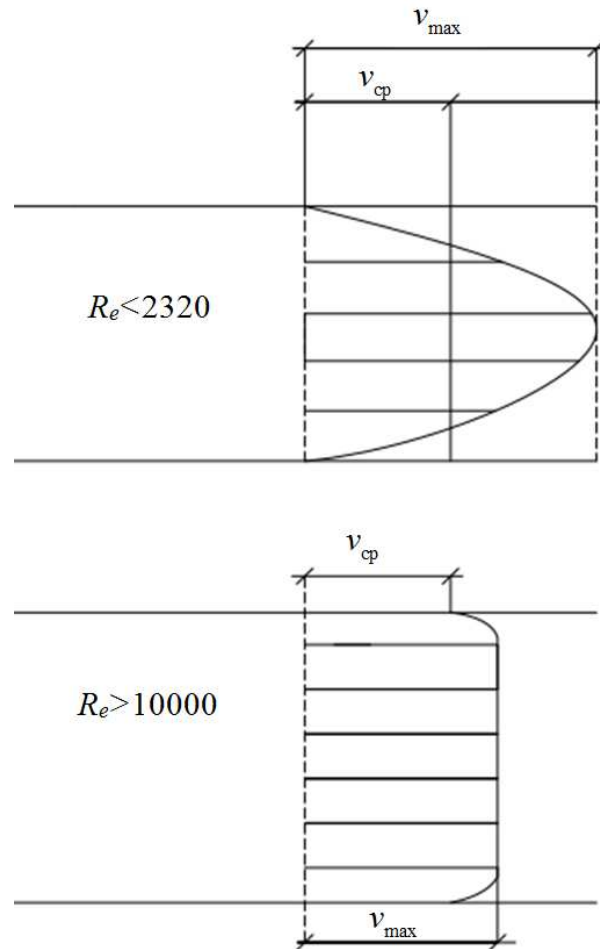


Рис. 10. Максимальные и средние скорости в зависимости от числа Рейнольдса.

При движении твердого тела в вязкой жидкости при обтекании его потоком возникает гидравлическое сопротивление со стороны жидкости, однако стоит учитывать, что тела могут иметь различную форму и по-разному располагаться по отношению к набегающему потоку. Это позволило классифицировать тела на каплевидные и пластичные (диски).

Если пластина или диск располагаются вдоль потока, то они называются хорошо обтекаемыми телами. Если же пластина или диск располагаются поперек потока, то это плохо обтекаемые тела, т.е. сила сопротивления зависит от форм и размера тела, а также от его ориентации по отношению к набегающему потоку.

Сопротивление, возникающее при обтекании тел потоком жидкости, можно разделить на сопротивление трения и сопротивление давления.



Для хорошо обтекаемых тел сопротивление давления составляет примерно 25% от сопротивления трения.

Для плохо обтекаемых тел сопротивление давления может составлять от 95 до 98% общего вязкого сопротивления тела.

Такое положение вопроса в практике выливается в определение линейных и местных сопротивлений при гидравлическом расчете, которые могут определяться по средствам специальных коэффициентов, номограмм, процентных надбавок или другими способами. Однако если рассмотреть эти решения в общем виде, то можно получить следующее:

Сопротивление трения (в общем виде):

$$F_T = \frac{C_T \cdot \omega \cdot \rho \cdot v^2}{2}, \quad (30)$$

где  $C_T$  – коэффициент сопротивления трения,  $C = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}$  (формула Блазиуса)

$\rho$  – плотность жидкости (газа)

$v$  – скорость

$\omega$  – площадь миделева сечения

Сопротивление давления обуславливается разностью давлений на лобовую и тыльную сторону поверхности обтекаемого тела. Отрыв с пограничного слоя приводит к образованию отрывного вихревого течения за телом. Изменение течения в пограничном слое связано с тем, что происходит резкое перемещение точек пограничного слоя от поверхности тела.

Для хорошо обтекаемых тел сопротивление давления определяется по формуле:

$$F_\partial = \frac{C_\partial \cdot \omega \cdot \rho \cdot v^2}{2}, \quad (31)$$

где  $C_\partial$  – коэффициент сопротивления давления, зависит от  $Re$  и формы тела.

### ***Гидравлика в инженерных задачах.***

Гидравлический расчет используется повсеместно от определения диаметров трубопроводов до расчета различного вида теплообменников. В качестве примера можно рассмотреть кожухотрубные теплообменники. Их применяют для теплообмена и термохимических процессов между различными жидкостями, парами и газами – как без изменения, так и с изменением их агрегатного состояния.

Кожухотрубные теплообменники появились в начале XX века в связи с потребностями тепловых станций в теплообменниках с большой поверхностью, таких, как конден-

саторы и подогреватели воды, работающие при относительно высоком давлении. Кожухотрубные теплообменники применяются в качестве конденсаторов, подогревателей и испарителей. В настоящее время их конструкция в результате специальных разработок с учетом опыта эксплуатации стала намного более совершенной. В те же годы началось широкое промышленное применение кожухотрубных теплообменников в нефтяной промышленности. Для эксплуатации в тяжелых условиях потребовались нагреватели и охладители массы, испарители и конденсаторы для различных фракций сырой нефти и сопутствующих органических жидкостей. Теплообменникам часто приходилось работать с загрязненными жидкостями при высоких температурах и давлениях, и поэтому их необходимо было конструировать так, чтобы обеспечить легкость ремонта и очистки.

Кожухотрубные теплообменники состоят из пучков труб, укрепленных в трубных досках, кожухов, крышек, камер, патрубков и опор. Трубное и межтрубное пространства в этих аппаратах разобраны, причем каждое из них может быть разделено перегородками на несколько ходов. Классическая схема кожухотрубчатого теплообменника показана на рисунке 11.

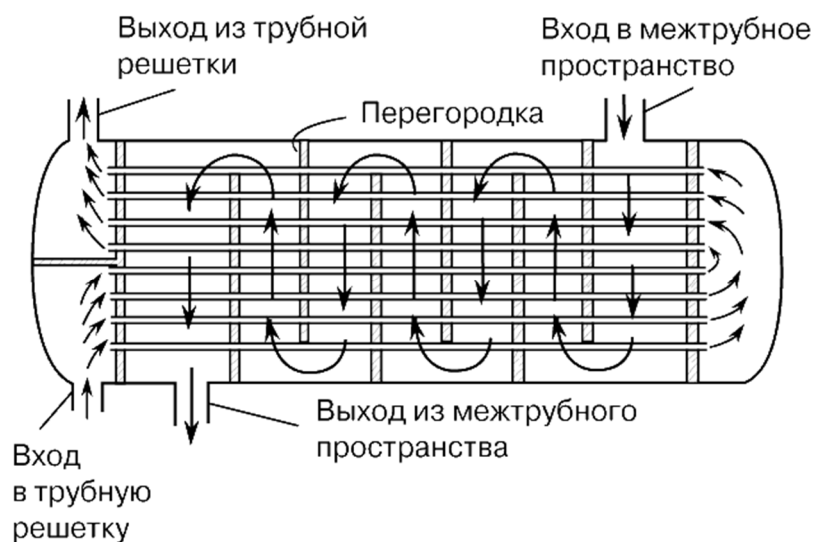


Рис. 11. Устройство кожухотрубчатого теплообменника. (Источник <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>)

Теплопередающая поверхность аппаратов может составлять от нескольких сотен квадратных сантиметров до нескольких тысяч квадратных метров. Так, конденсатор паровой турбины мощностью 150 МВт состоит из 17 тысяч труб с общей поверхностью теплообмена около 9000 м<sup>2</sup>.

Схемы кожухотрубчатых аппаратов наиболее распространенных типов представлены на рисунке 12.

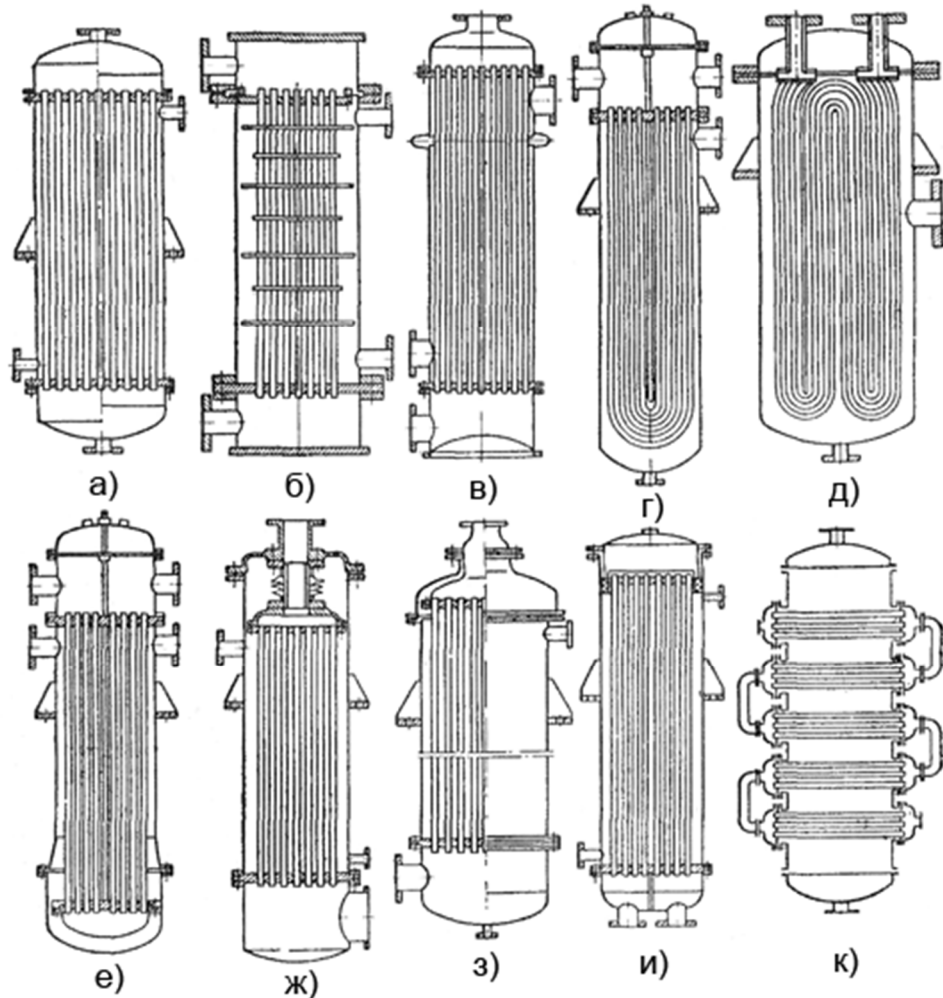


Рис. 12. Виды кожухотрубных теплообменников. (Источник <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>)

Кожух (корпус) кожухотрубчатого теплообменника представляет собой трубу, сваренную из одного или нескольких стальных листов. Кожухи различаются главным образом способом соединения с трубной доской и крышками. Толщина стенки кожуха определяется давлением рабочей среды и диаметром кожуха, но принимается не менее 4 мм. К цилиндрическим кромкам кожуха приваривают фланцы для соединения с крышками или днищами. На наружной поверхности кожуха прикрепляют опоры аппарата.

Кожухотрубчатые теплообменники могут быть жесткой (рис. а, к), нежесткой (рис. г, д, е, з, и) и полужесткой (рис. б, в, ж) конструкции, одноходовые и многоходовые, прямоточные, противоточные и поперечноточные, горизонтальные, наклонные и вертикальные.

С позиции гидравлики может потребоваться определить скорость жидкости в таких теплообменниках, как в трубном, так и в межтрубном пространстве, а также режим движения жидкости.

### 2.3.3. Раздел 3. Теплофизика как наука

#### *Теплофизика. Основные термины и определения. Способы теплообмена. Теплопроводность. Уравнение Фурье.*

Теплофизику часто расшифровывают как область физики, исследующую и изучающую тепловые процессы. Под тепловыми процессами может пониматься горение топлива, нагрев или охлаждение рабочих поверхностей, кипение, конденсация и так далее.

В качестве примера рассмотрим теплофизические процессы, происходящие в здании.

Теплообмен в здании происходит следующими способами: излучением, конвекцией и теплопроводностью.

Под **конвекцией** понимают процесс переноса теплоты при перемещении объёмов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Различают: - свободную конвекцию;  
 - естественную конвекцию;  
 - вынужденную конвекцию.

**Свободная конвекция** связана с неоднородностью плотности жидкости или газа и предметы помещения не оказывают воздействия на траекторию распространения конвективного потока жидкости или конвективной струи газа.

При **естественной конвекции** предметы помещения оказывают стесняющее воздействие на траекторию распространения конвективной струи, изменяя её траекторию.

**Вынужденная конвекция** осуществляется за счёт энергии побудителя движения или обусловлена побудителями тяги (насосами, компрессорами, вентиляторами).

**Излучение** или **лучистый теплообмен** – это процесс передачи энергии от одного тела к другому с помощью электромагнитных волн.

Явление передачи теплоты от более нагретой части тела к менее нагретой, или от более нагретого тела к менее нагретому через непосредственный контакт или промежуточные тела называется **теплопроводностью**.

Теплопоступления и теплопотери, от которых зависит температурный режим в помещениях, а, следовательно, в комфортное самочувствие людей, непосредственно зависят от таких физических свойств строительных материалов, как:

- теплопроводность;
- термическое сопротивление;
- коэффициент излучения (радиационная характеристика) поверхности ограждающей конструкции;
- коэффициент теплоотдачи ограждающей поверхности и т.д.

Интенсивность теплового потока, проходящего через кровлю, стены или пол, зависит от коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции.

**Коэффициент теплопередачи**  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), показывает, какое количество теплоты переходит в единицу времени от более нагретого к менее нагретому теплоносителю через 1 м<sup>2</sup> теплообменной поверхности при разности температур между теплоносителями 1°С.

**Коэффициент теплопроводности**  $\lambda$ , Вт/(м·°С), — интенсивность прохождения потока тепловой энергии через единицу поверхности материального слоя с однородной или неоднородной структурой, имеющего любую толщину, при перепаде температур в 1°С.

**Коэффициент теплоотдачи**  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), — характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1°С.

Излучательная способность объекта (**коэффициент теплового излучения**) — отношение мощности излучения объекта при данной температуре к мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ). АЧТ определяется как поверхность, излучающая максимальное количество энергии при данной температуре.

Плотность потока любой субстанции, переносимой микроскопическим способом, прямо пропорциональна градиенту соответствующего потенциала.

Исследуя явление теплопроводности в твёрдых телах, французский учёный Жан Батист Жозеф Фурье установил, что количество переданной теплоты теплопроводностью пропорционально падению температуры и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока:

$$Q_m = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \cdot F \quad (32)$$

Плотность потока теплоты  $q_m$ , Вт/м<sup>2</sup>, прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q}_m = -\lambda \text{ grad } T \quad (33)$$

Знак минус «-» в законе Фурье указывает на то, что градиент температуры направлен в сторону возрастания потенциала, а плотность потока теплоты — в сторону уменьшения потенциала.

***Излучение и конвекция. Основные термины и определения. Уравнение Стефана-Больцмана. Краткие сведения о теории подобия.***

Лучистый теплообмен (радиационный теплообмен) осуществляется за счёт теплового излучения тел. **Лучистый (радиационный) теплообмен** - это процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. При этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением (лучистым теплообменом или радиационным теплообменом).

В любом теле, находящемся при температуре  $t > 0^\circ\text{C}$  часть внутренней тепловой энергии непрерывно превращается в энергию электромагнитного излучения. Эта электромагнитная лучистая энергия покидает излучающие тела, попадая на другие окружающие предметы. Это излучение частично поглощается, частично отражается, частично пропускается (в прозрачных конструкциях) и поглощаемая часть энергии снова в предмете трансформируется в тепловую энергию.

В промышленных зданиях определяют лучистый теплообмен от нагретого оборудования.

При закрытых дверях загрузочных отверстий теплопоступления считаются аналогичным образом, как и для стен. При открывании двери загрузочного отверстия печи в помещение поступает мощный радиационный поток, который рассчитывается по уравнению Стефана-Больцмана с учётом облученности соответствующих поверхностей.

Удельный тепловой поток от загрузочного отверстия при открывании дверей определяется по зависимости:

$$q_{\text{отв}} = \phi_{\text{отв}} \cdot C_0 \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \quad (34)$$

Тоннель загрузочного отверстия оказывает диафрагмирующее действие на лучистый тепловой поток, поэтому он рассчитывается с учетом коэффициента облученности  $\phi_{\text{отв}}$ , который определяется из графиков в зависимости от геометрических размеров отверстия.

Что касается конвекции, то при описании данного процесса уравнениями нельзя не отметить понятия критериев подобия - безразмерные числа, состоящие из величин, заданных по условию задачи. Стоит также отметить, что безразмерные числа, состоящие из незadanнх по условиям задачи величин, называют числами подобия.

Помимо ранее рассмотренного критерия Осборна Рейнольдса, характеризующего режим движения жидкости следует обратить внимание на следующие критерии подобия.

Критерий подобия Вильгельма Нуссельта характеризует процесс теплообмена между теплоносителем и стенкой:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (35)$$

Критерий подобия Людвиг Праудтля характеризует физические свойства теплоносителя:

$$Pr = \frac{a}{\nu} \quad (36)$$

Критерий Франца Грасгофа характеризует режим движения теплоносителя при свободной конвекции:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (t_c - t_o)}{\nu^2}, \quad (37)$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности,

$\beta$  - температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя,

$t_c - t_o$  - разность между температурой поверхности теплообмена и температурой теплоносителя.

Критерии подобия безразмерны, поскольку размерности физических величин, входящих в их числитель и знаменатель, сокращаются. Умножая такие критерии на другую безразмерную величину (например, перемножая два критерия) можно получить новые критерии подобия (так называемые составные критерии).

Поскольку критерии подобия отвечают необходимым условиям физического подобия, имеющих место для натурального объекта и его модели, необходимо строгое соблюдение их значений. Например, при аэродинамических испытаниях для обеспечения равенства критерия Рейнольдса необходимо, при уменьшении размеров модели пропорционально увеличивать скорость набегающего потока, поэтому модели автомобилей для таких испытаний делают в натуральную величину.

### ***Основы теплоотдачи. Основные термины и определения. Факторы, влияющие на теплоотдачу.***

Под теплоотдачей понимают сложный вид теплообмена, сочетающий в себе теплопроводность и конвекцию. Зависит от множества факторов, которые условно можно разделить на 4 большие группы:

1. Природа возникновения движения жидкости вдоль стенки.

В зависимости от причины, вызывающей конвективный теплообмен различают 2 вида движения: свободное и вынужденное.

Свободное движение в жидкости называется естественной конвекцией, вызывается подъемной силой, обусловленной разностью плоскостей холодных и нагретых частиц жидкости.

Вынужденное движение жидкости – вынужденная конвекция, которая обусловлена работой внешних агрегатов (насосов, вентиляторов), а движущая сила при этом возникает вследствие разницы давлений на выходе и входе из канала, по которому перемещается жидкость.

## 2. Режим движения жидкости:

Может иметь ламинарный и турбулентный характер (подробно описаны ранее). Стоит отметить, что при турбулентном течении возникает пограничий слой, теория которого впервые была введена в 1904 году Людвигом Прандтлем.

Пограничный слой – некоторая область, ширина которой намного меньше, чем характерный размер тела, который прилипает к обтекаемой поверхности тела, в пределах которой скорость измеряется от 0 на поверхности до скорости, составляющей 98 – 99% от скорости набегающего невозмущенного потока.

## 3. Физические свойства жидкости

На процесс теплоотдачи жидкости непосредственно влияют следующие физические параметры жидкости: теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, вязкость, температуропроводность.

Известно, что абсолютно все жидкости обладают вязкостью, т.е между частицами или слоями перемещения с различными скоростями, всегда возникают силы внутреннего трения, противодействующие движению.

Для описания этих процессов Исаак Ньютон вводит специальное уравнение «Уравнения вязкого трения Ньютона», представляющее собой произведение динамической вязкости или коэффициента трения на скоростной сдвиг (градиент скорости).

$$F = \mu \frac{dv}{dn} \quad (38)$$

Все жидкости, которые подчиняются этому закону называют ньютоновскими, а которые не подчиняются неньютоновскими. Стационарные неньютоновские жидкости (бингамовская, дилатантная, псевдопластичная) и нестационарные (тиксотропная, реопектантная, максвелловская) изучаются в разных науках, например, в реологии (изучает особенности течения жидкостей под нагрузкой).

Температуропроводность тел связана протеканием в них нестационарных тепловых процессов, наблюдаемых обычно при нагревании или охлаждении.



Скорость теплового процесса при нестационарном режиме является соотношением, которое называется температуропроводностью. Чем выше величина температуропроводности, тем быстрее все точки тела при его остывании и нагревании, достигнут одинаковой  $t$ .

4. Форма, размеры и состояния поверхности стенки, омываемой жидкостью.

Обычно поверхности стенок имеют форму плит или труб, которые могут располагаться вертикально, горизонтально или наклонно. Каждая из этих форм поверхности создает специальные условия для теплообмена между поверхностью стенки и жидкостью, омывающую эту поверхность.

Для процесса теплоотдачи очень важно перемещается ли жидкость внутри замкнутого пространства или поверхность стенки со всех сторон омывается жидкостью.

Большое значение имеет состояние поверхности стенки, оцениваемое ее шероховатостью.

***Теплофизика в инженерных задачах. Определение сопротивления теплопередачи наружных ограждающих конструкций. Построение температурного графика внутри стены.***

Рассматривая распределение значений температуры в наружном ограждении, будем считать, что тепловой поток движется через ограждение от внутренней среды к внешней по направлению, перпендикулярному плоскости ограждения и все параметры процесса передачи теплоты не изменяются во времени (т.е. будем считать наружное ограждение одномерным стационарным полем). Теплозащитные свойства такого ограждения определяются сопротивлением теплопередаче этого ограждения  $R_0$ , (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Перепады температур по сечению ограждения пропорциональны соответствующим термическим сопротивлениям, т.е. можно записать следующее выражение:

$$\frac{t_g - t_x}{t_g - t_n} = \frac{R_{g-x}}{R_0}, \quad (39)$$

где  $t_n$  – расчетная температура внутренней среды (воздуха внутри помещения), °С, для жилых и общественных зданий принимается для промышленных по соответствующим нормативным документам;

$t_x$  – температура в произвольном сечении  $x$  наружного ограждения, °С;

$t_n$  – расчетная температура наружной среды (наружного воздуха), °С, принимается по нормативным документам, (для жилых и общественных зданий – по параметрам Б, т.е. как температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92);

$R_{\epsilon-x}$  – сопротивление теплопередаче от воздуха помещения до характерного сечения  $x$  в ограждении,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;

$R_0$  – сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Таким образом, значение температуры в произвольном сечении  $x$  наружного ограждения определяется по формуле:

$$t_x = t_\epsilon - \frac{R_{\epsilon-x}}{R_0} (t_\epsilon - t_n), \quad (40)$$

Если наружное ограждение состоит из одного или нескольких плоских однородных слоёв, расположенных перпендикулярно направлению теплового потока, то сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$  определяется по формуле:

$$R_0 = R_\epsilon + \sum R_i + R_{\epsilon.n.} + R_n, \quad (41)$$

где  $R_\epsilon$  – теплообмен на внутренней поверхности ограждения,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;

$\sum R_i$  – сумма термических сопротивлений отдельных слоёв ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

$R_n$  – теплообмен на внутренней поверхности ограждения,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Значения теплообменов на внутренней и внешней поверхностях определяются по формулам:

$$R_\epsilon = \frac{1}{\alpha_\epsilon}, \quad (42)$$

$$R_n = \frac{1}{\alpha_n}, \quad (43)$$

где  $\alpha_\epsilon$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Термическое сопротивление для  $i$ -го слоя многослойной ограждающей конструкции (или для однородной конструкции) определяют по формуле:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (44)$$

где  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя или однородной конструкции, м;

$\lambda_i$  – расчётный коэффициент теплопроводности материала  $i$ -го слоя,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

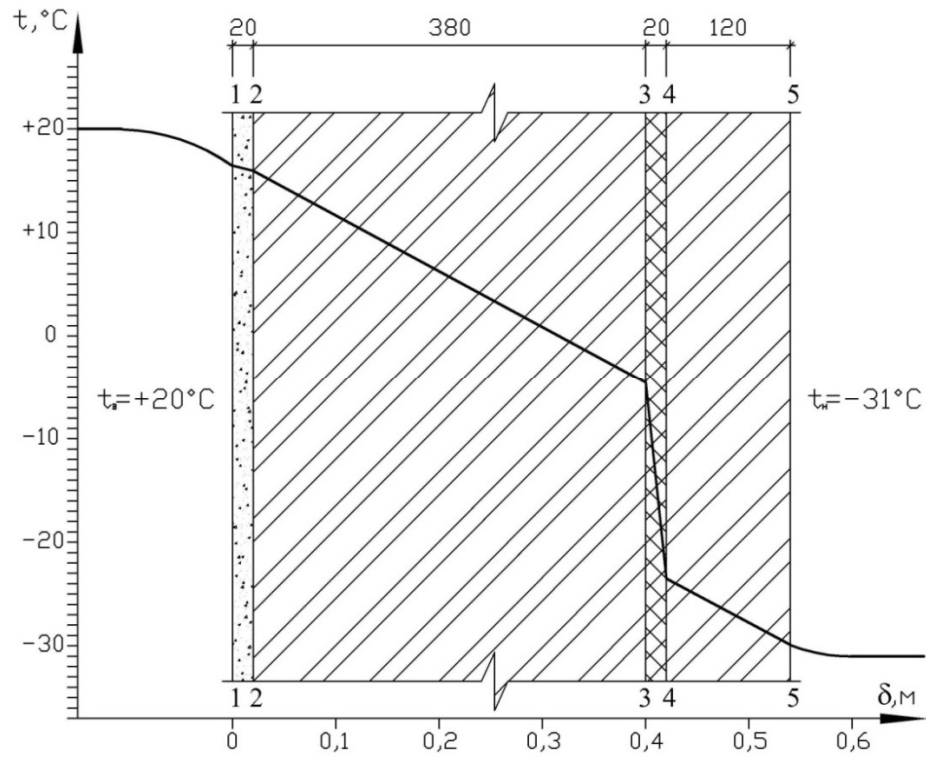


Рис.13. Пример распределение значений температур в толще многослойной конструкции наружной стены.

### 3. Методические указания по подготовке к практическим занятиям

#### 3.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям

В ходе подготовки к практическим занятиям необходимо изучать основную литературу, знакомиться с дополнительной литературой, а также с новыми публикациями в периодических изданиях: журналах, газетах и т.д. с учетом рекомендаций преподавателя и требований учебной программы.

При подготовке к занятиям можно также подготовить краткие конспекты по вопросам темы. Также важно самостоятельно решать пройденные на занятиях задачи во время подготовки, для выработки соответствующих навыков.

Своевременное и качественное выполнение самостоятельной работы базируется на соблюдении настоящих рекомендаций и изучении рекомендованной литературы. Студент может дополнить список использованной литературы современными источниками, не представленными в списке рекомендованной литературы, и в дальнейшем использовать собственные подготовленные учебные материалы при написании курсовых и дипломных работ.

#### *Особенности построения термодинамических циклов. Решение задач.*

Базовые процессы рекомендуется первоначально строить вручную в трех системах координат (P-V, V-T, P-T), связывая построение с уравнением Менделеева-Клайперона. Для построения более сложных циклов, например, связанных с паровой и жидкой фазами следует пользоваться готовыми h-s диаграммами или специальными программными продуктами, например, от neurothermal.

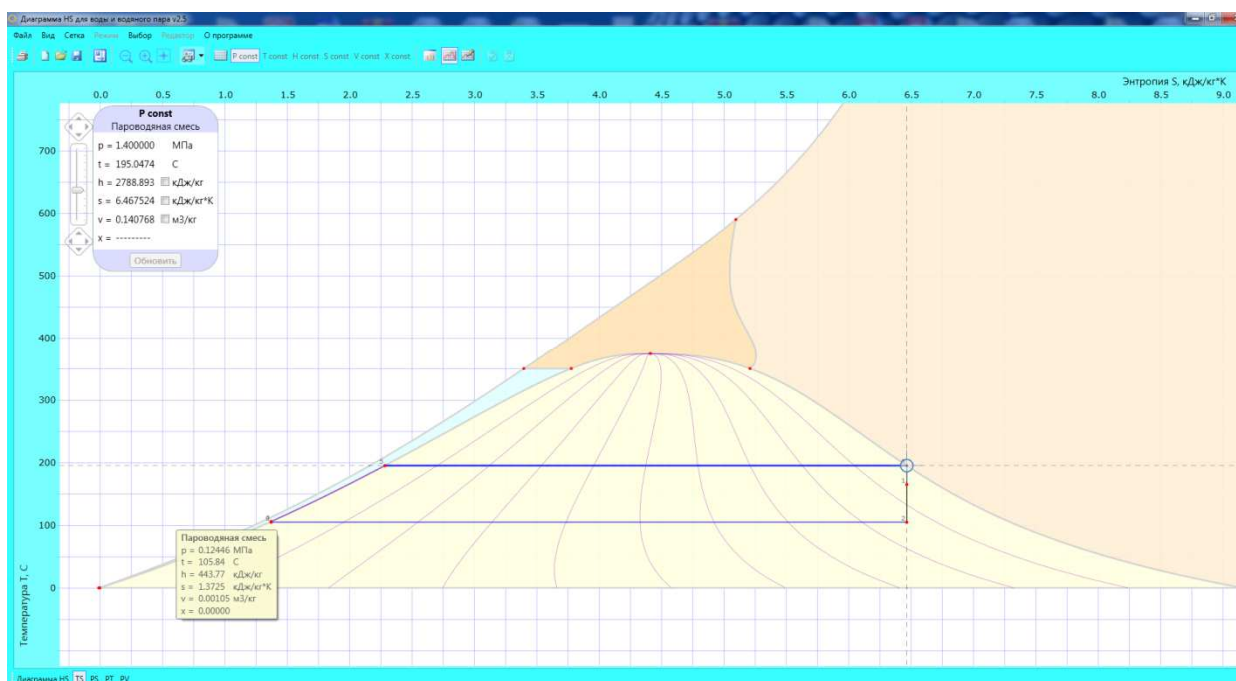


Рис.14. Пример работы в программе от neurothermal «Диаграмма H-S для воды и водяного пара» V2.5.

**Опыт Рейнольдса. Ламинарное и турбулентное течение. Решение задач.**

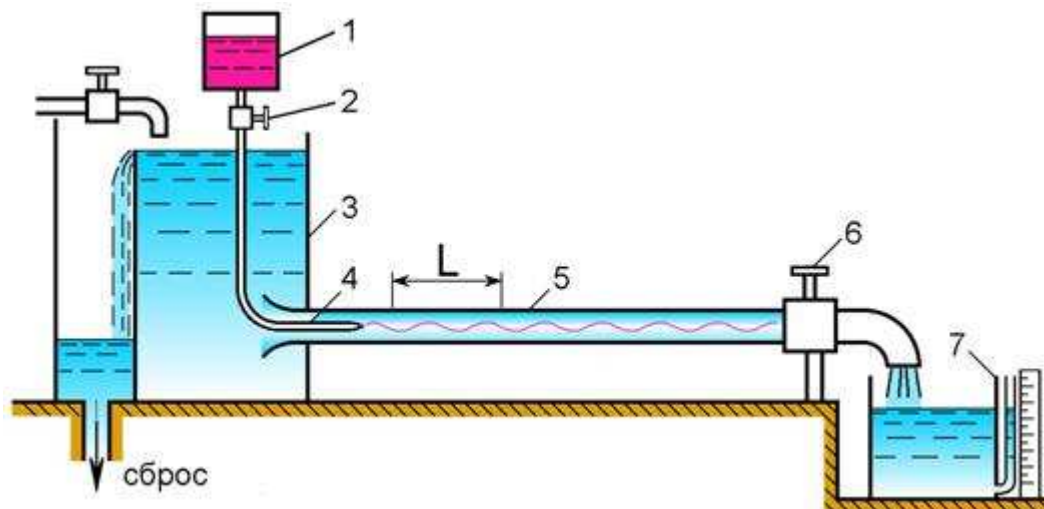


Рис.15. Опытная установка Рейнольдса. (Источник <https://studopedia.ru/>)

К достаточно большому по объему баку 3 присоединена стеклянная труба 5, в конце которой установлен вентиль 6. Этим вентилем можно менять расход жидкости в трубе, который измеряется при помощи мерного бака 7. Над баком 3 расположен сосуд 1 с раствором краски, плотность которого близка к плотности исследуемой жидкости. Краска вводится в поток при помощи трубки 4. Количество подаваемой краски регулируется вентилем 2. В процессе проведения экспериментов уровень жидкости в баке 3 поддерживается постоянным.

При определенном открытии вентиля 6 в трубе 5 установится некоторая скорость потока и при открытии крана 2 в поток поступит струйка краски.

При малой скорости потока жидкости в трубе 5 краска образует прямолинейную и резко выделяющуюся не смешивающуюся с окружающей жидкостью струйку. Заметного обмена частицами между струйкой краски и окружающей ее жидкостью не происходит. При этом никакого значения не имеет, в каком месте поперечного сечения трубы была выпущена струйка краски. Это свидетельствует о том, что при данном открытии вентиля 6 жидкость движется отдельными не перемешивающимися слоями. Измерения давления и скорости показывают их неизменность во времени, т.е. отсутствуют пульсации. Такой режим движения называется ламинарным.

Ламинарное движение является вполне упорядоченным и при постоянном напоре установившимся течением (хотя в общем случае может быть и неустановившимся). Однако, его нельзя считать безвихревым, т.к. в нем хотя и нет видимых вихрей, но одновременно с поступательным движением имеет место упорядоченное вращательное движение отдельных частиц жидкости вокруг своих мгновенных центров с некоторыми угловыми скоростями.

При постепенном открытии вентиля скорость потока жидкости в трубе будет увеличиваться. Вначале это не приведет к изменению картины течения жидкости, но затем при определенной скорости течения наступает быстрое ее изменение. Струйка краски при выходе из трубки 4 начинает двигаться волнообразно, затем разрываться и перемешиваться с потоком жидкости. При этом становятся заметными вихреобразования и вращательное движение жидкости. Измерения показывают непрерывные пульсации давления и скорости в потоке жидкости. Такой режим течения принято называть турбулентным.

При турбулентном течении векторы скоростей имеют не только продольные (осевые), но и поперечные составляющие. Поэтому наряду с основным осевым перемещением жидкости вдоль трубы происходят поперечные неупорядоченные перемещения как жидких частиц, так и отдельных объемов жидкости.

На рис.16 приведена примерная картина изменения характера течения потока жидкости, при изменении его скорости.

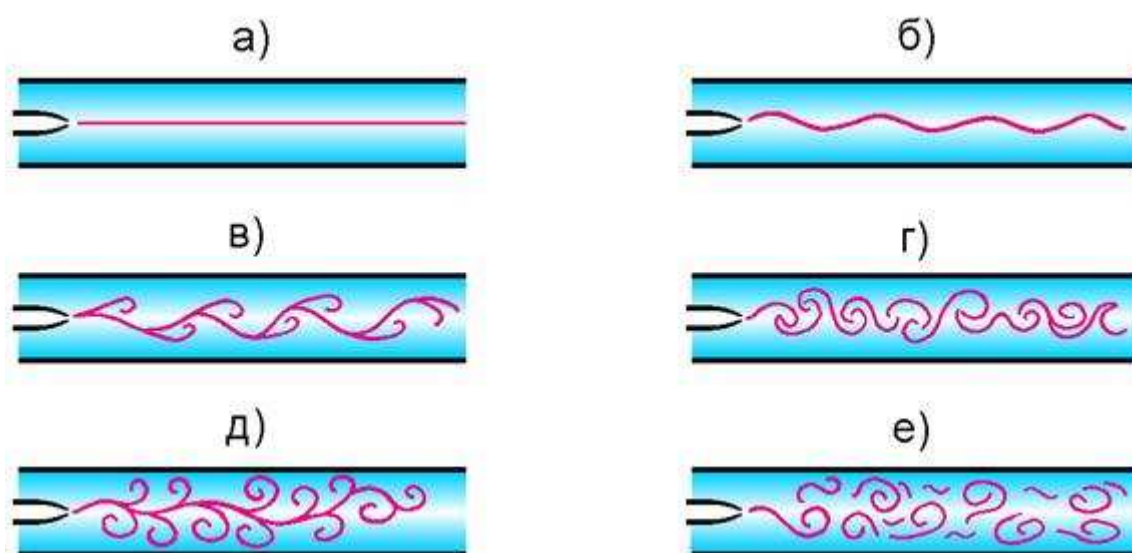


Рис.16. Постепенное увеличение скорости потока жидкости от а до е и результат изменения характера течения жидкости. (Источник <https://studopedia.ru/>)

**Основные параметры I-d диаграммы влажного воздуха. Построения на i-d диаграмме.**

**Определение температуры точки росы в помещении. Графический и аналитический методы определения параметров микроклимата влажного воздуха.**

Если известны показания сухого  $t_c$  и мокрого  $t_m$ , термометров, то с помощью H-d, (I-d) диаграммы можно найти  $\phi$ , а также значение всех остальных параметров, определяющих тепловлажное состояние воздуха, рис. 17.

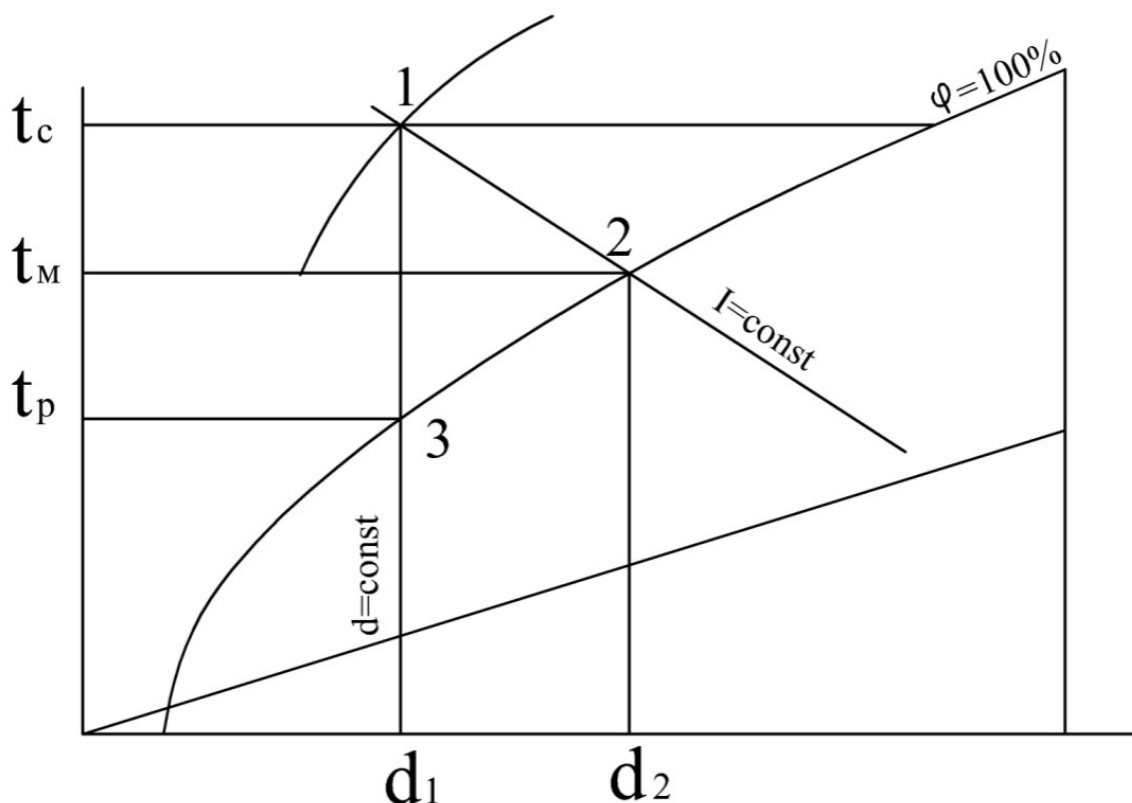


Рис. 17. Определение температуры точки росы по  $I-d$  диаграмме

Через точку **2**, лежащую на пересечении кривой, соответствующей относительной влажности  $\varphi = 100\%$  и изотермы, соответствующей температуре мокрого термометра  $t_M$ , проводится линия энтальпии при  $i = const$  до пересечения с изотермой, соответствующей температуре сухого термометра  $t_c$ . Полученная точка **1** определяет состояние воздуха, в том числе и его относительную влажность.

Если из точки **1** провести линию вертикально вниз (процесс охлаждения воздуха при постоянном влагосодержании  $d = const$ ), то пересечение этой линии с кривой  $\varphi = 100\%$  произойдет в точке **3**, определяющей температуру точки росы и соответствующей максимально возможному охлаждению без выпадения влаги из воздуха. При дальнейшем охлаждении водяной пар будет конденсироваться, образуя росу или иней на охлажденных поверхностях.

**Порядок определения параметров (часть параметров определяется как графическим, так и аналитическим методом)**

### Влагосодержание

Влагосодержанием  $d$  влажного воздуха называется отношение массы водяного пара  $m_n$ , содержащегося в смеси, к массе сухого воздуха,  $m_b$ ,

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}, \text{ кг/кг}_{\text{с.в.}} \quad (45)$$

и определяется, кг/кг<sub>с.в.</sub>, по формуле:

$$d = 0,622 \cdot \left[ \frac{P_{\text{п}}}{(P_{\text{б}} - P_{\text{п}})} \right] \quad (46)$$

### Молекулярная масса

Молекулярная масса влажного воздуха, кг, определяется по формуле:

$$\mu = 28,95 - 10,93 \cdot \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{б}}} \quad (47)$$

### Газовая постоянная воздуха

Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К), определяется по формуле:

$$R = \frac{8314}{[28,95 - 10,93 \cdot \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{б}}}]} = \frac{8314}{\mu} \quad (48)$$

### Плотность воздуха

Плотность влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup> – количество вещества, заключенное в массу единицы объема [2], определяется по формуле:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{P_{\text{б}}}{R \cdot T} \quad (49)$$

### Энтальпия воздуха

Энтальпия влажного воздуха это энергия, которая может быть преобразована в теплоту при определенных значениях температуры и давления воздуха. Энтальпия влажного воздуха определяется как сумма энтальпий сухого воздуха и водяного пара. Энтальпия 1 кг сухого воздуха, выраженная в кДж, численно почти равна его температуре  $t$ , так как теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении равна 1,005 кДж/(кг·К). Следовательно,  $I_{\text{в}} = c_{\text{р}} \cdot t = 1,005 \cdot t$ , кДж/кг.

Теплоемкость влажного воздуха равна  $c_{\text{п}} = 2500 + 1,8068 \cdot t \cdot 10^{-3}$ , кДж/кг<sub>с.в.</sub>. Таким образом, зная температуру влажного воздуха, можно определить чему равна его энтальпия, кДж/кг:

$$I = 1,005 \cdot t + (2500 + 1,8068 \cdot t) \cdot \frac{d}{1000} \quad (50)$$

### Удельная массовая теплоемкость

**Теплоемкостью** называется количество теплоты, которое нужно подвести к газу или отнять от него для изменения температуры газа на 1°С.

**Удельная теплоемкость** – отношение теплоты, полученной единицей количества вещества при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры.

**Удельная массовая теплоемкость**, кДж/(кг<sub>с.в.</sub>·К) – теплоемкость влажного воздуха отнесенная к 1 кг сухого воздуха, определяется по формуле:

$$c_{\text{р}} = c_{\text{в}} + d \cdot c_{\text{п}}, \quad (51)$$



где  $c_{\text{в}}=1,005$  кДж/(кг $_{\text{с.в.}}$ ·К) – теплоемкость сухого воздуха;

$c_{\text{п}}=1,8068$  кДж/(кг·К) – теплоемкость водяного пара.

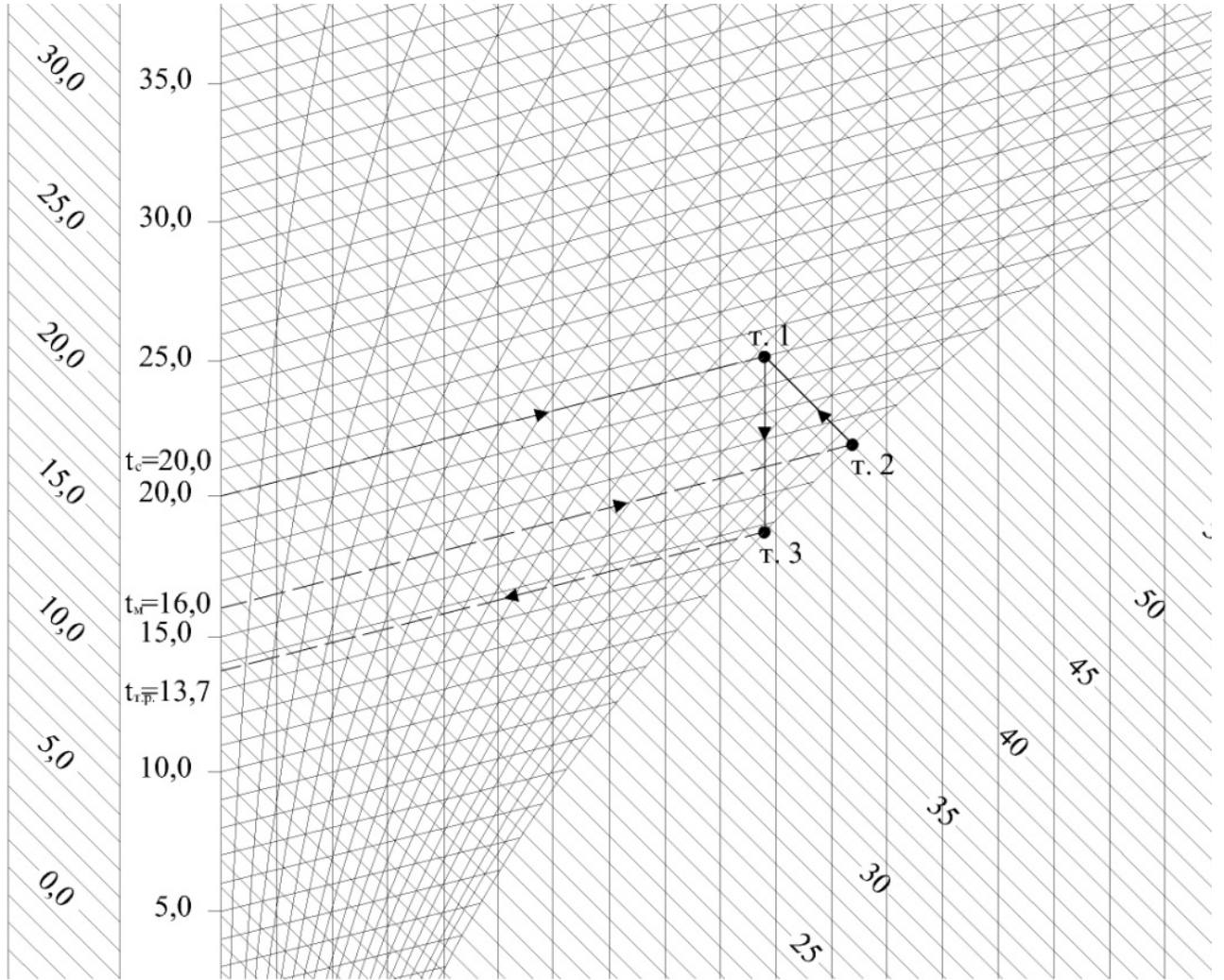


Рис. 18. Пример графического определения данных по I-d диаграмме

## **4. Методические указания по организации самостоятельной работы**

### **4.1 Общие рекомендации для самостоятельной работы**

Самостоятельная работа студентов является основным способом овладения учебным материалом в свободное от обязательных учебных занятий время.

Целями самостоятельной работы студентов являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации.

Самостоятельная работа выполняется в два этапа: планирование и реализация.

Планирование самостоятельной работы включает:

- уяснение задания на самостоятельную работу;
- подбор рекомендованной литературы;
- составление плана работы, в котором определяются основные пункты предстоящей подготовки.

Составление плана дисциплинирует и повышает организованность в работе.

На втором этапе реализуется составленный план. Реализация включает в себя:

- изучение рекомендованной литературы;
- составление плана (конспекта) по изучаемому материалу (вопросу);
- обсуждение материала.

Необходимо помнить, что на лекции обычно рассматривается не весь материал. Оставшаяся часть восполняется в процессе самостоятельной работы. В связи с этим работа с рекомендованной литературой обязательна.

Работа с литературой и иными источниками информации включает в себя две группы: техническую, имеющую библиографическую направленность, и содержательную. Первая группа – уяснение потребностей в литературе; получение литературы; просмотр литературы на уровне общей, первичной оценки; анализ надежности публикаций как источника информации и степени её полезности. Вторая – подробное изучение и извлечение необходимой информации.

Для поиска необходимой литературы можно использовать следующие способы:

- поиск через систематический каталог в библиотеке;
- просмотр специальных периодических изданий;
- использование материалов, размещенных в сети Интернет.

Для того, чтобы не возникало трудностей понимания текстов учебника, монографий, научных статей, следует учитывать, что учебник и учебное пособие предназначены для студентов и магистрантов, а монографии и статьи ориентированы на исследователя. Монографии дают обширное описание проблемы, содержат в себе справочную информацию и отражают полемику по тем или иным дискуссионным вопросам. Статья в журнале кратко излагает позицию автора или его конкретные достижения в исследовании какой-либо научной проблемы.

В процессе взаимного обсуждения материала закрепляются знания, а также приобретает практика в изложении и разъяснении полученных знаний, развивается речь.

При необходимости студенту следует обращаться за консультацией к преподавателю.

Составление записей или конспектов позволяет составить сжатое представление по изучаемым вопросам. Записи имеют первостепенное значение для самостоятельной работы студентов. Они помогают понять построение изучаемого материала, выделить основные положения, проследить их логику.

Ведение записей способствует превращению чтения в активный процесс. У студента, систематически ведущего записи, создается свой индивидуальный фонд подсобных материалов для быстрого повторения прочитанного. Особенно важны и полезны записи тогда, когда в них находят отражение мысли, возникшие при самостоятельной работе.

Можно рекомендовать следующие основные формы записи: план, конспект, тезисы.

План – это схема прочитанного материала, краткий (или подробный) перечень вопросов, отражающих структуру и последовательность материала. Подробно составленный план вполне заменяет конспект.

Конспект – это систематизированное, логичное изложение материала источника. Объем конспекта не должен превышать 10 страниц. Шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Список литературы должен состоять из 5-8 источников, по возможности следует использовать последние издания учебных пособий и исследований.

Тезисы — это последовательность ключевых положений из какой-либо темы, без доказательств или с неполными доказательствами. По объему тезисы занимают одну страницу формата А4 или одну – две страницы в ученической тетради. В конце тезисов студент должен сделать собственные выводы.

Далее приводятся примеры тем для самостоятельного изучения.

### *Газовые смеси*

В термодинамических расчетах реальные газы, входящие в состав газовой смеси с относительно невысоким давлением, рассматриваются как идеальные газы, при этом и сама газовая смесь тоже рассматривается как идеальная. Такое допущение дает возможность при расчетах газовых смесей пользоваться законами идеальных газов, в частности законом Джона Дальтона, который лежит в основе изучения газовых смесей.

Давление газовой смеси ( $p$ ) равно сумме парциальных давлений ее компонентов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (52)$$

Для газовой смеси, подчиняющейся закону Дальтона, справедливы следующие положения:

- 1) каждый газ, входящий в газовую смесь, имеет температуру, равную температуре смеси;
- 2) каждый из компонентов газовой смеси распространяется по всему объему, занимаемому смесью, а поэтому объем каждого из них равен объему всей смеси;
- 3) каждый из газов, входящих в смесь, подчиняется своему уравнению состояния;
- 4) смесь в целом условно является как бы новым газом, отличающимся от ее компонентов и подчиняющимся своему уравнению состояния.

Немаловажным для термодинамики и впоследствии теплотехники является закон Эмиля Амага, согласно которому общий объем  $V$  смеси газов, химически не взаимодействующих друг с другом, равен сумме тех индивидуальных объемов  $V_i$ , которые занимал бы каждый из этих газов, взятый при той же температуре и под тем же давлением, что и газовая смесь.

Отношение массы каждого газа к общей массе смеси называют массовой долей:

$$g_1 = \frac{m_1}{m}; g_2 = \frac{m_2}{m}; \dots; g_n = \frac{m_n}{m} \quad (53)$$

где  $g_1, g_2, g_n$  – массовые доли;

$m_1, m_2, m_n$  – массы газов по отдельности;

$m$  – масса смеси.

Сумма массовых долей всех газов смеси равняется единице.

Отношение парциального объема к объему всей смеси называют объемной долей:

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; r_2 = \frac{V_2}{V}; \dots; r_n = \frac{V_n}{V} \quad (54)$$

где  $r_1, r_2, r_n$  – объемные доли;

$V_1, V_2, V_n$  – парциальные объемы газов смеси;

$V$  – объем смеси газов.

### *Краткие сведения об аэродинамике*

Аэродинамика (происходит от греческих слов «воздух» и «сила») – это наука, изучающая законы движения воздуха в зависимости от действующих на нее сил и на их основе устанавливает частные законы взаимодействия между воздухом и движущимся в нем твердым телом. Однако, данное определение, учитывая необходимость движения твердого тела, применимо в большей степени для авиации и космонавтики, в то время как для зданий и сооружений можно охарактеризовать аэродинамику, как науку изучающую процессы обтекания твердых тел жидкостями или газами.

В своей монографии «Экспериментальная аэродинамика» А.К. Мартынов характеризует аэродинамику как часть гидромеханики или механики нетвердых тел. Он также подразделяет аэродинамику на:

теоретическую, которая является в основном прикладной математикой и механикой; экспериментальную, занимающуюся рассмотрением самого явления и обобщающую результаты опытов;

аэродинамику самолета, в которой рассматриваются полеты различных летательных аппаратов и разрабатываются методы их аэродинамического расчета;

промышленную аэродинамику, в которой изучаются вопросы применения аэродинамики в народном хозяйстве (частным случаем может служить аэродинамика зданий и сооружений).

Гидромеханика является разделом более общей науки – механики сплошных сред, и подразделяется на гидростатику и гидродинамику.

Основоположником современных аэро- и гидромеханики можно по праву считать выдающегося русского ученого Николая Егоровича Жуковского, которому принадлежит знаменитое высказывание, - «человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума». Под его руководством была создана одна из первых в мире аэродинамических труб в 1902 г., основан первый в Европе аэродинамический институт (современный ЦАГИ) в 1904 г., организована аэродинамическая лаборатория в Московском техническом училище в 1910 г.

Исследование внешней аэродинамики зданий и различных летательных аппаратов, производится в аэродинамических трубах, представляющих собой установки, создающие поток воздуха или газа для проведения экспериментов с целью изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.

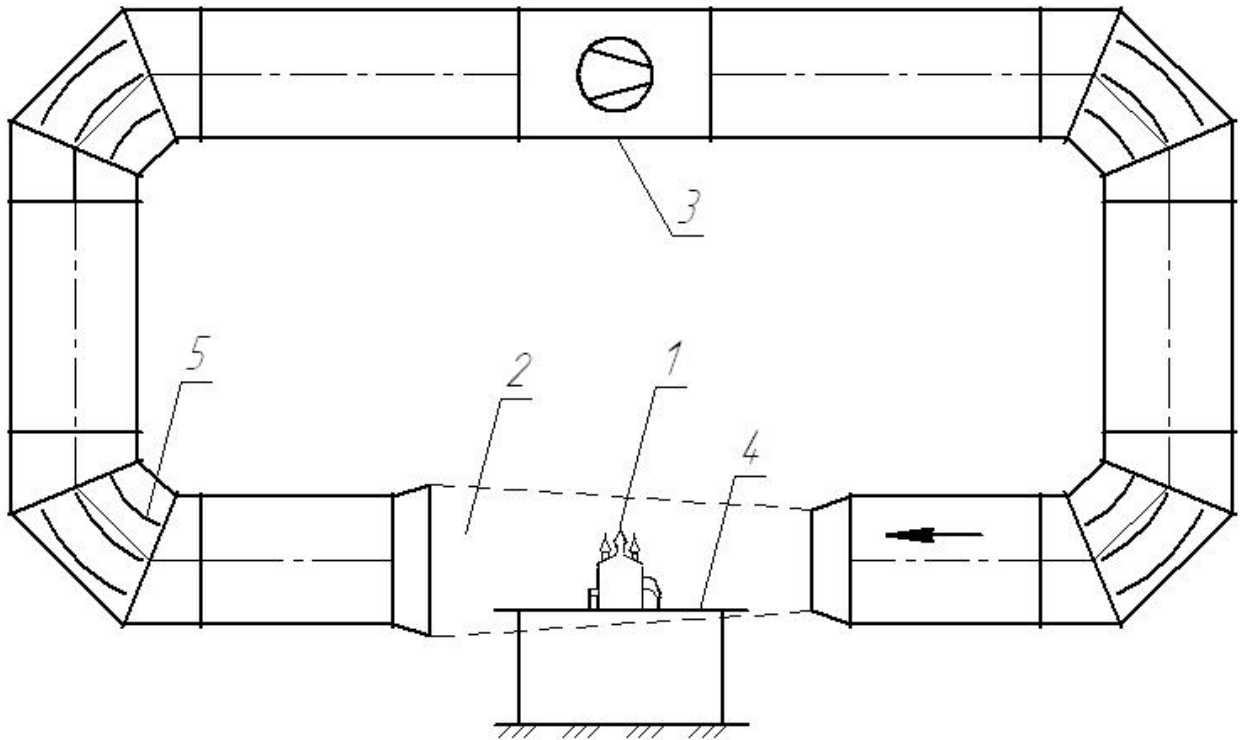


Рис. 19. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемая модель объекта; 2 – рабочая область аэродинамической трубы; 3 – осевой вентилятор; 4 – подставка под модель здания; 5 – направляющие ребра

Аэродинамические коэффициенты  $c_v$ , нахождение которых является целью аэродинамических исследований, представляют собой величину, определяющую степень восприятия динамического давления набегающего потока на поверхности обтекаемого потоком тела. Эта безразмерная величина, равная удвоенному значению числа Эйлера:

$$c_v = 2 \cdot Eu \quad (55)$$

Физический смысл числа Эйлера аналогичен физическому смыслу аэродинамического коэффициента:

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot v^2} \quad (56)$$

где:  $P$  - статическое давление на поверхности модели, Па;

$v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$\rho$  - плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>.

#### 4.2 Пример тестового задания для проверки знаний

<p>Вопрос № 1 Какого термодинамического процесса не существует:</p>	
а) изохорный	в) политропный
б) адиабатный	г) тиксотропный
<p>Вопрос № 2 Для определения режима движения жидкости находят:</p>	
а) критерий Гухмана	в) критерий Нуссельта
б) критерий Рейнольдса	г) критерий Фруда
<p>Вопрос № 3 Закон сохранения энергии это:</p>	
а) нулевое начало термодинамики	в) второе начало термодинамики
б) первое начало термодинамики	г) третье начало термодинамики
<p>Вопрос № 4 Цикл Карно состоит из:</p>	
а) двух изобар двух изохор	в) двух изотерм двух адиабат
б) двух адиабат двух изохор	г) двух изобар двух адиабат
<p>Вопрос № 5 Уравнение <math>P \cdot V = \nu \cdot R \cdot T</math> называется</p>	
а) уравнением Эйлера	в) уравнением Менделеева-Клайперона
б) уравнением Бернулли	г) уравнением Ван-дер-Ваальса
<p>Вопрос № 6 К термическим параметрам не относится:</p>	
а) внутренняя энергия	в) давление
б) температура	г) нет правильных ответов
<p>Вопрос № 7 На I-d диаграмме влажного воздуха нельзя определить:</p>	
а) влагосодержание	в) энтальпию
б) энтропию	г) парциальное давление

<p>Вопрос № 8 Турбулентным называют течение:</p>	
а) сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений	в) идеализированное и необходимое только для теоретических экспериментов
б) сопровождающееся равномерным движением жидкости слоями, которые не перемешиваются	г) нет правильного ответа
<p>Вопрос № 9 Идеальный газ - это</p>	
а) модель газа, в которой между молекулами отсутствуют силы взаимного притяжения, а сами молекулы принимаются за материальные точки, взаимодействия между которыми сводится к их абсолютно упругим ударам.	в) физико-математическая модель газа, который легче воздуха и состоит из молекул одного элемента, например, азота.
б) природный газ.	г) газ, который не подчиняется уравнению Менделеева-Клапейрона
<p>Вопрос № 10 К стационарным жидкостям не относится:</p>	
а) бингамовская	в) псевдопластичная
б) дилатантная	г) реопектантная
<p>Вопрос № 11 Изохорный процесс проходит при:</p>	
а) постоянной температуре	в) постоянном давлении
б) постоянном объеме	г) нет правильных ответов
<p>Вопрос № 12 При изучении термодинамики для газов особую важность представляют следующие теплоемкости:</p>	
а) изохорная	в) изохорная и изобарная
б) изобарная	г) нет правильных ответов
<p>Вопрос № 13 Воздух в среднем по объему состоит из:</p>	
а) 79% азота и 21% кислорода	в) 21% азота и 79% кислорода
б) 50% азота и 50% кислорода	г) 98% кислорода и прочие компоненты



<p>Вопрос № 14 Какой параметр у газовой смеси и её компонентов связывает закон Амага</p>	
а) объем	в) температура
б) давление	г) количество вещества
<p>Вопрос № 15 Закон Фурье связывает:</p>	
а) теплоемкость и энтальпию	в) градиент температур и плотность теплового потока
б) скоростной сдвиг и силу трения	г) скорость диффузии и градиент концентрации
<p>Вопрос № 16 Определяющим законом, дающим возможность классифицировать жидкости на ньютоновскую и неньютоновскую является:</p>	
а) закон инерции Ньютона	в) дифференциальный закон движения Ньютона
б) закон о равенстве действия и противодействия Ньютона	г) закон вязкости (внутреннего трения) Ньютона
<p>Вопрос № 17 Какого способа теплообмена не существует:</p>	
а) конвекция	в) теплопроводность
б) излучение	г) нет правильного ответа
<p>Вопрос № 18 Для определения силы Архимеда или силы поддержания необходимо знать (уберите лишнее)</p>	
а) плотность жидкости или газа	в) объем части тела, погруженного в жидкость или газ
б) коэффициент трения	г) ускорение свободного падения
<p>Вопрос № 19 Абсолютное давление (продолжите фразу):</p>	
а) определяется как сумма избыточного и атмосферного давлений	в) равно абсолютному
б) равно избыточному	г) определяется как разность абсолютного и избыточного давлений
<p>Вопрос № 20 Кожухотрубный теплообменник представляет собой трубу, сваренную из одного или нескольких стальных листов, внутри которой располага(е)ются (продолжите фразу):</p>	
а) вакуум	в) пучки труб
б) пластины	г) насадки в виде колец Рашига

## Литература

1. Глухов, В. С. Основы гидравлики и теплотехники. Раздел 1. Основы гидравлики : учебное пособие / В. С. Глухов, А. А. Дикой, И. В. Дикая. – Армавир : Армавирский государственный педагогический университет, 2019. – 252 с. – Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. – <http://www.iprbookshop.ru/82446.html>. – ISBN 2227-8397. – Текст : электронный.
2. Основы гидравлики и аэродинамики : учебник для студентов, учащихся техникумов и колледжей по дисциплинам "Санитарно-технические устройства, теплогазоснабжение и вентиляция зданий" / В. И. Калицун [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 2001. – 296 с. : ил. – ISBN 5-274-00456-3. – Текст : непосредственный.
3. Основы гидравлики и аэродинамики : учебник для студентов, учащихся техникумов и колледжей по дисциплинам "Санитарно-технические устройства, теплогазоснабжение и вентиляция зданий" / В. И. Калицун [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Альянс, 2018. – 296 с. : ил. – ISBN 978-5-00106-110-6. – Текст : непосредственный.
4. Тимченко, В. И. Гидравлика : практикум для студентов / В. И. Тимченко ; Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса. – Шахты : ЮРГУЭС, 2010. – 41 с. – Текст : непосредственный.
5. Гидравлика. Гидравлические и пневматические системы: практикум / В. И. Тимченко. – Шахты : ЮРГУЭС, 2008. – 53 с. – Текст : непосредственный.
6. Гидравлика. Гидравлические и пневматические системы в автомобилях и гаражном оборудовании: практикум / В. И. Тимченко, И. К. Гугуев, А. И. Шилин, А. Г. Илиев. – Шахты : ЮРГУЭС, 2008. – 53 с. – Текст : непосредственный.
7. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод : учебное пособие для вузов / Т. В. Артемьева [и др.] ; под редакцией С. П. Стесина. – Москва : Академия, 2009. – 336 с. – Текст : непосредственный.
8. Сологаев, В. И. Механика жидкости и газа : конспекты лекций / В. И. Сологаев. – Омск : СиБАДИ, 2010. – 56 с. – ISBN 5-230-15352-0. – Текст : непосредственный.
9. Донец, К. Г. Механика жидкости и газа : пособие / К. Г. Донец ; Южно-Российский государственный институт экономики и сервиса (филиал). – Шахты : ЮРГУЭС, 2008. – 48 с. – Текст : непосредственный.
10. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учебник для вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др.]. – 2-е изд., перераб. – Москва : Машиностроение, 2010. – 423 с. – Текст : непосредственный.

11. Сапронов, А. Г. Энергосбережение на предприятиях бытового обслуживания : учебное пособие / А. Г. Сапронов, В. А. Шаповалов ; под редакцией А. Г. Сапронова. – Шахты : ЮРГУЭС, 2009. – 115 с. – Текст : непосредственный.
12. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод : учебное пособие для вузов / Т. В. Артемьева [и др.] ; под редакцией С. П. Стесина. – 3-е изд., стер. – Москва : Академия, 2008. – 336 с. – Текст : непосредственный.
13. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений : учебное пособие / А. М. Протасевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 239 с. – Текст : непосредственный.
14. Бухмиров, В. В. Тепломассообмен : учебное пособие / В. В. Бухмиров ; Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. – Иваново, 2014. – 360 с. – Текст : непосредственный.
15. Бухмиров, В. В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / В. В. Бухмиров, Д. В. Ракутина, Ю. С. Солнышкова ; Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2009. – 104 с. – Текст : непосредственный.
16. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 416 с. – Текст : непосредственный.
17. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – Москва : ГЭИ, 1956. – 390 с. – Текст : непосредственный.
18. Сухов, В. В. Основы конструирования и расчёта теплообменных аппаратов : учебно-методическое пособие / В. В. Сухов, Г. М. Казаков. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2009. – 60 с. – Текст : непосредственный.
19. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : справочник / А. А. Александров ; Государственная служба стандартных справочных данных, ГСССД Р-776-98. – Москва : МЭИ, 1999. – 168 с. – Текст : непосредственный.
20. NeuroThermal (сайт). – URL: <http://neurothermal.ru/>. – Текст : электронный.
21. Портал теплообменного оборудования. – URL: <http://www.teploobmenka.ru/>. – Текст : электронный.
22. Студопедия. – URL: <https://studopedia.ru/>. – Текст : электронный.

Соколов Михаил Михайлович

## **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ, ТЕПЛОТЕХНИКИ И АЭРОДИНАМИКИ**

Учебно-методическое пособие

по подготовке к лекционным и практическим занятиям по дисциплине «Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики» для обучающихся по направлению подготовки 08.02.08 Монтаж и эксплуатация оборудования и систем газоснабжения.

---

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
<http://www.nngasu.ru>, [srec@nngasu.ru](mailto:srec@nngasu.ru)