

# ТНис 01

- Предмет «Теплоносители и их свойства»
- Параметры состояния
- Уравнения состояния газов

# Основные сведения



Автор: к.т.н., доцент кафедры Тепловых  
электрических станций НГТУ  
Шаров Юрий Иванович.

Учебное пособие по вариативной дисциплине БЗ  
«Теплоносители и их свойства» в форме слайд-конспекта  
подготовлено в 2014 году и предназначено для:  
бакалавров направления (специальности) 140100.62  
Теплоэнергетика и теплотехника

(ФГОС введен в действие приказом № 635 от 18.11.2009 г.,  
регистрационный номер 15818, дата утверждения 24.12.2009 г.).

# Расчасовка лекционного курса

Семестр	5		
Лекции, час.	18		
Практические занятия, час.		18	
Лабораторные занятия, час.		18	
Индивидуальная работа, час.		0	
Всего аудиторных занятий, час.		54	
Из них в активной и интерактивной форме, час.		16	
Самостоятельная работа, час.		54	
В том числе КП, КР. РГЗ, подготовка к контр. работе, час.			Контр.
Консультации, час.		-	
Зачет, диф. зачет, час.		ДЗ	
Сессия (экзамен), час.		-	
Всего часов	108		
Всего зачетных единиц (кредитов)		3	

# Список литературы

## Основной список:

1. Шаров Ю. И. Техническая термодинамика [Электронный ресурс] : слайд-конспект лекций / Ю. И. Шаров. - Новосибирск, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с #.
2. Шаров Ю. И. Основы теплотехники и перенос энергии и массы [Электронный ресурс] : слайд-конспект лекций / Ю. И. Шаров. - Новосибирск, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с #.
3. Овчинников, Ю.В. Основы технической термодинамики / Ю. В. Овчинников. – Новосибирск: НГТУ. – 2010. – 292 с.
4. Шаров Ю.И. О диаграммах состояния экологически безопасных хладагентов / Ю.И. Шаров, Г.А. Долгополов // Теплоэнергетические системы и агрегаты. – 2003. Выпуск 7. – С. 199-205.

# Дополнительный список литературы

## **Дополнительный список:**

1. Варгафтик Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.– М.: Наука, 1972.
2. Теплотехника // под ред. И.Н. Сушкина. - М. : Metallургия, 1981. – 479 с.
3. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции / В.Я. Рыжкин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 327 с.
4. Шаров Ю.И. Техническая термодинамика. Сборник лабораторных работ / Ю.И. Шаров, П.А. Щинников. – Новосибирск: НГТУ. – 2011. – 16 с.
5. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. - М.: Высшая школа. – 1980. – 559 с.

# Дополнительный список литературы

6. Шаров Ю.И. Расчет теплообменника ЦТП : методические указания к РГР для студентов ФЭН / НГТУ ; [сост. Ю.И. Шаров]. – Новосибирск, 2013. – 32 с.
7. Холодильная установка : методические указания для студентов ФЭН / НГТУ ; [сост. Ю.И. Шаров]. – Новосибирск, 2018. – 19 с.
8. Григорьева О.К. Исследование термодинамических процессов поршневого компрессора : методические указания / НГТУ ; [сост. О.К. Григорьева, О.В. Боруш]. – Новосибирск, 2013. – 16 с.
9. Шаров Ю.И. Тенденции развития ТЭС / Ю.И. Шаров, О.В. Боруш. – Новосибирск : НГТУ. – 2017, – 259 с.
10. Wustmann, F. Stand der Umsetzung des DREWAG–Energieconzeptes / F. Wustmann // Kraftwerktechnisches Kolloquium. Technische Universität Dresden. – 2015. – Vortrag 2.

# Теплоносители

**Теплоносителями** являются: воздух, газообразные продукты сгорания топлива в тепловых двигателях. В холодильных установках теплота переносится хладоносителями (холодильными агентами).

Эти теплоносители можно считать практически идеальными газами или смесями идеальных газов. Для технических нужд часто требуется сжатый воздух, для его получения применяются компрессоры.

В системах теплоснабжения и отопления используются горячая вода и водяной пар.

Водяной пар это реальный газ. Свойства идеальных и реальных газов изучаются в технической термодинамике.

# Наука – техническая термодинамика

**Техническая термодинамика** – это наука, изучающая закономерности взаимного преобразования тепловой и механической энергий.

**Тепловая энергия** – это энергия хаотического движения молекул и атомов газа.

**Механическая энергия** – это энергия движения макроскопических тел (человека, автомобиля, самолета).

Преобразование механической энергии в тепловую происходит легко и не требует особых условий.



# Преобразование тепловой энергии в механическую

Преобразование тепловой энергии в механическую можно осуществить только в тепловом двигателе:

- двигателе внутреннего сгорания (ДВС),
- паротурбинной установке (ПТУ),
- газотурбинной установке (ГТУ).

Преобразование тепловой энергии в механическую в тепловом двигателе происходит **при расширении газообразного рабочего тела.**

# Рабочее тело – идеальный газ

В ДВС и ГТУ таким рабочим телом являются газообразные продукты сгорания топлива, а в паротурбинной установке (ПТУ) – водяной пар, полученный в парогенераторе.

Газообразные продукты сгорания топлива можно считать практически идеальным газом.

Водяной пар является реальным газом и не подчиняется законам идеальных газов.

**Идеальный газ** – это газ, состоящий из недеформируемых молекул, не имеющих собственного объема и не взаимодействующих между собой.

# Терминология термодинамики

**Термодинамическая система** – это совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергией как друг с другом, так и с окружающей (внешней) средой. Примером такой системы является газ в цилиндре с подвижным поршнем.

**Изолированная (замкнутая) термодинамическая система**, если она не взаимодействует с окружающей средой.

**Теплоизолированная (адиабатная) система** окружена адиабатной оболочкой, исключающей теплообмен с окружающей средой.

Например, газ в сосуде, покрытом идеальной теплоизоляцией.

# Однородная, гомогенная и гетерогенная системы

**Однородная система** – это система с одинаковым составом и физическими свойствами во всем объеме.

**Гомогенная система**, если внутри нее нет поверхностей раздела (лед, вода, пар).

**Гетерогенная система** состоит из нескольких макроскопических частей с различными физическими свойствами, разделенными между собой видимыми поверхностями раздела.

Гомогенные части системы, отделенные от остальных частей видимыми поверхностями раздела, называются **фазами** (вода со льдом – двухфазная система).

# Удельный объем рабочего тела

Состояние рабочего тела описывается параметрами состояния.

Всего в термодинамике шесть параметров состояния: удельный объем, абсолютное давление, абсолютная температура, внутренняя энергия, энтальпия и энтропия.

**Удельный объем** – это объем 1 кг газа, м<sup>3</sup>/кг:

$$v=V/m,$$

где  $V$  – полный объем газа, м<sup>3</sup>;

$m$  – масса газа, кг.

# Плотность газа

Величина, обратная удельному объему, называется **плотностью** – массой  $1 \text{ м}^3$  газа,  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho = m/V.$$

Отсюда следует, что их произведение равно единице:

$$\rho v = 1.$$

**Давление газа** в молекулярно-кинетической теории газов трактуется как средний результат ударов молекул о стенки сосуда.

# Давление газа

Оно направлено по нормали к стенке сосуда и представляет собой силу, действующую на  $1 \text{ м}^2$  поверхности:

$$1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па.}$$

Давление может также измеряться в Мега Паскалях, барах, атмосферах, миллиметрах ртутного столба, метрах водяного столба.

Соотношения между ними:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} = 750 \text{ мм.рт.ст.} = 0,981 \text{ ат} = 9,81 \text{ м.вод.ст.}$$

# Параметр состояния – абсолютное давление

Атмосферное давление  $B$  измеряется барометром, избыточное  $p_{и}$  (превышающее атмосферное) – манометром, разрежение  $p_{в}$  (вакуум) – вакуумметром.

Параметром же состояния является абсолютное давление  $P_a$ .

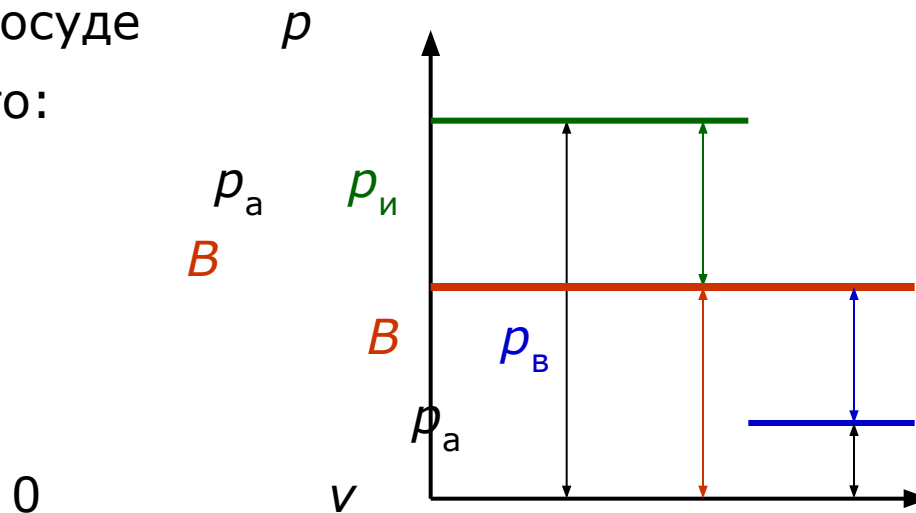
Если давление в сосуде выше атмосферного:

$$p_a = B + p_{и};$$

а если ниже

атмосферного, то:

$$p_a = B - p_{в}.$$





# Параметр состояния абсолютная температура

**Температура** характеризует степень нагрева тела и представляет собой меру средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Понятие температура применимо только к макротелам и не имеет смысла для одной или нескольким молекул.

Температура измеряется жидкостными термометрами, термометрами сопротивления, термопарами, оптическими пирометрами.

# Основное уравнение теории газов

Параметром состояния является абсолютная температура, К:

$$T, \text{К} = t, \text{°С} + 273,15.$$

За 0 °С принята температура плавления льда при атмосферном давлении, а за 100 °С – температура кипения воды.

Все законы идеальных газов были получены вначале опытным путем, а затем выведены **из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов:**

$$p = \frac{2}{3} nm \overline{v^2}$$

# Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

где  $p$  – давление, Па;  $n$  – количество молекул в единице объема, мол/м<sup>3</sup>;  $m$  – масса молекулы, кг;  $w$  – средняя скорость движения молекул, м/с.

Обозначим через  $N$  число молекул в 1 кг газа, тогда уравнение (1) запишется в виде:

$$p = \frac{2 N m w^2}{3 v}$$

Перенесем удельный объем в левую часть уравнения и учтем, что кинетическая энергия пропорциональна температуре  $mw^2/2=BT$ , где  $B$  – коэффициент пропорциональности.

# Объединенный закон Бойля-Мариотта и Гей-Люссака:

Тогда уравнение молекулярно-кинетической теории для двух состояний газа запишется в виде:

$$p_1 v_1 = 2/3 N B T_1; \quad p_2 v_2 = 2/3 N B T_2.$$

Поделив левые и правые части этих уравнений одно на другое и перенеся начальные параметры влево, а конечные – вправо,

получим выражение объединенного закона  
Бойля-Мариотта и Гей-Люссака:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \text{const.} \quad (2)$$

# Законы идеальных газов

Из выражения (2) при  $T=const$  получаем **закон Бойля-Мариотта**:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \text{или} \quad p v = const; \quad (3)$$

при  $p=const$  – **закон Гей-Люссака**:

$$v_1/T_1 = v_2/T_2 \quad \text{или} \quad v/T = const; \quad (4)$$

а при  $v=const$  – **закон Шарля** для идеальных газов:

$$p_1/T_1 = p_2/T_2 \quad \text{или} \quad p/T = const. \quad (5)$$

# Уравнение состояния идеальных газов

В выражении (2) объединенного закона Бойля-Мариотта и Гей-Люссака для произвольного состояния газа:

$$pv/T = \text{const.}$$

Назовем *Const* газовой постоянной, обозначим ее буквой *R*, приведем уравнение к общему знаменателю и мы получим **уравнение состояния идеальных газов (Клапейрона) для 1 кг:**

$$pv = RT. \quad (6)$$

# Уравнение Клапейрона

Умножая левую и правую части уравнения Клапейрона на массу газа  $m$  и учитывая, что  $m\nu=V$ , получим

уравнение состояния идеальных газов для произвольной массы газа  $m$ :

$$pV=mRT. \quad (7)$$

# Уравнение Клапейрона – Менделеева

Русский ученый Д.И. Менделеев предложил по аналогии записать уравнение Клапейрона **для 1 кило моля газа**,

умножив левую и правую части выражения (6) на молекулярную массу  $\mu$ :

$$p(\mu v) = (\mu R)T. \quad (8)$$



# Кило моль газа

Уравнение (8) носит название Клапейрона-Менделеева.

**1 кило моль газа** – это масса газа в килограммах, численно равная его молекулярной массе  $\mu$ .

$(\mu v)$  – объем 1 кило моля газа,  $\text{м}^3/\text{кмоль}$ ;

$(\mu R)$  – универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ .

# К выводу закона Авогадро

Пусть имеются два равных объема  $V_1 = V_2 = V$  двух разных газов.

Давление каждого из газов можно выразить по основному уравнению молекулярно-кинетической теории газов:

$$p_1 = \frac{2}{3} n_1 \frac{m_1 w_1^2}{2} \quad p_2 = \frac{2}{3} n_2 \frac{m_2 w_2^2}{2}$$

Пусть давления газов равны между собой  $p_1 = p_2$ , тогда:

$$\frac{2}{3} n_1 \frac{m_1 w_1^2}{2} = \frac{2}{3} n_2 \frac{m_2 w_2^2}{2}$$

Пусть температуры газов тоже равны между собой, то есть равны их средние кинетические энергии  $m_1 w_1^2 / 2 = m_2 w_2^2 / 2$ .

# Закон Авогадро

Из выражения (9) при этом следует:  $n_1 = n_2$ . (10)

Умножив обе части уравнения на объем  $V$ , получим:  
 $n_1 V = n_2 V$ . После сокращения одинаковых объемов газов  $V$   
получим **выражение закона Авогадро**:

$$N_1 = N_2, \quad (11)$$

то есть в равных объемах разных газов при одинаковых физических условиях ( $p_1 = p_2$ ;  $T_1 = T_2$ ) содержится равное число молекул.

# Следствие из закона Авогадро

Выражение (10) – это закон Авогадро для 1 м<sup>3</sup> газов.

Масса газа в 1 м<sup>3</sup> – это его плотность  $\rho$ , значит

$$\rho_1 = \frac{\mu_1}{V_1}, \quad \rho_2 = \frac{\mu_2}{V_2}$$

то есть:

при  $p_1 = p_2$ ;  $T_1 = T_2$  плотности газов пропорциональны их молекулярным массам – следствие из закона Авогадро.

# Объемы кило молей газов

С учетом того, что  $\rho = 1/v$ :

$$v_2/v_1 = \mu_1/\mu_2,$$

или:

$$, \quad \mu_1 v_1 = \mu_2 v_2 \quad (13)$$

то есть при одинаковых физических условиях объемы кило молей разных газов равны между собой.

# Газовая постоянная

Найдем из уравнения Клапейрона – Менделеева (8), записанного для нормальных физических условий, величину универсальной газовой постоянной, Дж/(кмоль·К):

$$(\mu R) = \frac{p_0(\mu v_0)}{T_0} = \frac{101325 \cdot 22,414}{273,15} = 8314.$$

Тогда газовая постоянная для конкретного газа, например, для воздуха, Дж/(кг·К):

$$R = (\mu R) / \mu = 8314 / 29 = 287.$$