

# *ОСНОВЫ термодинамики*

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the frame, creating a modern, layered effect. The text is positioned on the left side of the image.

# Термодинамика и внутренняя энергия

**Термодинамика** — это наука, изучающая тепловые явления без учёта молекулярного строения тел.

- На первый план выступают тепловые процессы и энергетические преобразования



# ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

АВТОР	СУТЬ ВВЕДЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
<b>Д. Фаренгейт (1685-1736)</b> голландский физик, мастер-стеклодув	В 1710 – 1714 годах предложил шкалу и термометр: 0° - температура смеси воды, льда и поваренной соли, 32° - температура смеси воды и льда, 212° - температура кипения воды, 96° - температура тела человека.
<b>А. Цельсий (1701 – 1744),</b> шведский физик и астроном.	В 1742 году предложил стоградусную шкалу температур: 0° - температура таяния льда, 100° - температура кипения воды
<b>Ж. Понселе (1788 – 1867),</b> французский физик и инженер.	В 1826 году ввел понятие работы и единицы её измерения.
<b>С. Карно (1796 – 1832),</b> французский физик и инженер.	Ввел представление об идеальной тепловой машине, а в 1824 году фактически дал формулировку второго начала термодинамики, связал тепло с движением частиц тела.
<b>Б. Клапейрон (1799 – 1864),</b> французский физик и инженер.	В 1834 году вывел уравнение состояния идеального газа, обобщенное в дальнейшем Д. И. Менделеевым.

# ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

АВТОР	СУТЬ ВВЕДЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
<b>Р. Майер (1818 – 1878),</b> немецкий врач и естествоиспытатель.	В 1842 году одним из первых сформулировал закон сохранения и превращения энергии.
<b>Дж. Джоуль (1818 – 1889),</b> английский физик	В 1843 году первый вычислил механический эквивалент теплоты и пришел к закону сохранения энергии.
<b>Г. Гельмгольц (1821 – 1894),</b> немецкий физик и естествоиспытатель	В 1847 году дополнив идеи Майера и опыты Джоуля, сформулировал и математически обосновал закон сохранения и превращения энергии.
<b>Р. Клаузиус (1822 – 1888),</b> немецкий физик-теоретик.	В 1850 году сформулировал второе начало термодинамики, а в 1854 г. дал математическую формулировку первого начала.
<b>У. Томсон (Кельвин) (1824 – 1907),</b> английский физик.	В 1848 году ввел понятие абсолютной температуры, в 1851 году сформулировал второе начало термодинамики.

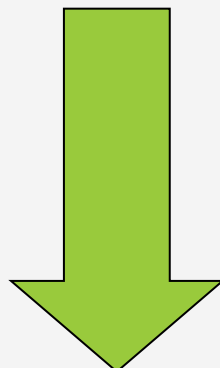
# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

## ИЗОЛИРОВАННЫЕ

Не обмениваются с другими системами ни веществом ни энергией

## СТАТИЧЕСКИЕ

При отсутствие взаимодействия параметры системы остаются неизменными



Любая совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют между собой и с внешними объектами посредством передачи энергии и вещества.

## ОТКРЫТАЯ

Живой организм

Обменивается и энергией

## ЗАКРЫТАЯ

утюг

не обменивается, но обменивается энергией

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

С окружающей средой веществом

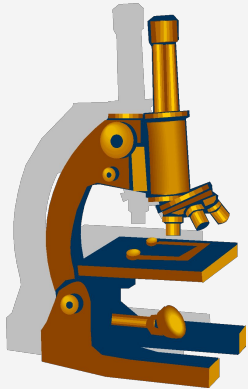


# ЧТО ИЗУЧАЕТ ТЕРМОДИНАМИКА?

- ✓ Возникла как наука тепловых процессов, рассматриваемых с точки зрения энергетических преобразований.
- ✓ Не рассматривает явления с точки зрения движения молекул.
- ✓ Изучает наиболее общие свойства макроскопических систем, находящихся в равновесном состоянии, и процессы их перехода из одного состояния в другое.
- ✓ Термодинамический метод широко используется в других разделах физики, химии, биологии.
- ✓ Как и любая физическая теория или раздел физики, имеет свои границы применимости.

# ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕРМОДИНАМИКИ

- ▶ Неприменима к системе из нескольких молекул.



- Не может быть применима ко всей Вселенной, слишком сложной и неопределенной физической системе.



# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Совокупность физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы.

**V** - объём

**P** - давление

**T** - температура

**U** - внутренняя энергия



# Внутренняя энергия

► Определение:

Внутренняя энергия тела - это сумма кинетической энергии хаотического теплового движения частиц (атомов и молекул) тела и потенциальной энергии их взаимодействия

► Обозначение:

U

► Единицы измерения:

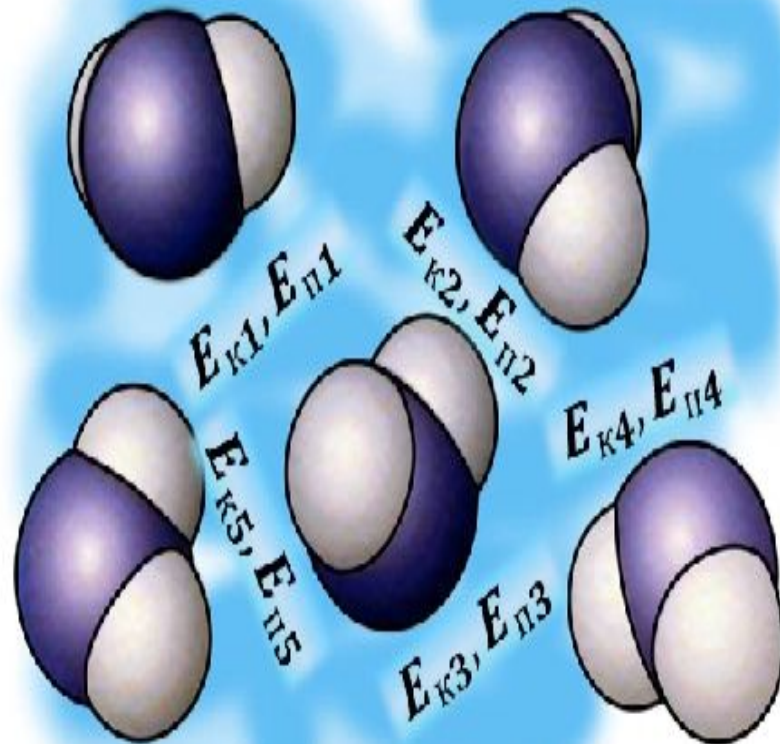
[Дж]

# внутренняя энергия

Внутренняя энергия тела — это суммарная потенциальная и кинетическая энергия всех частиц, входящих в тело.

$$U = E_k + E_{п}$$

$$[U] = [\text{Дж}]$$



# Внутренняя энергия идеального газа

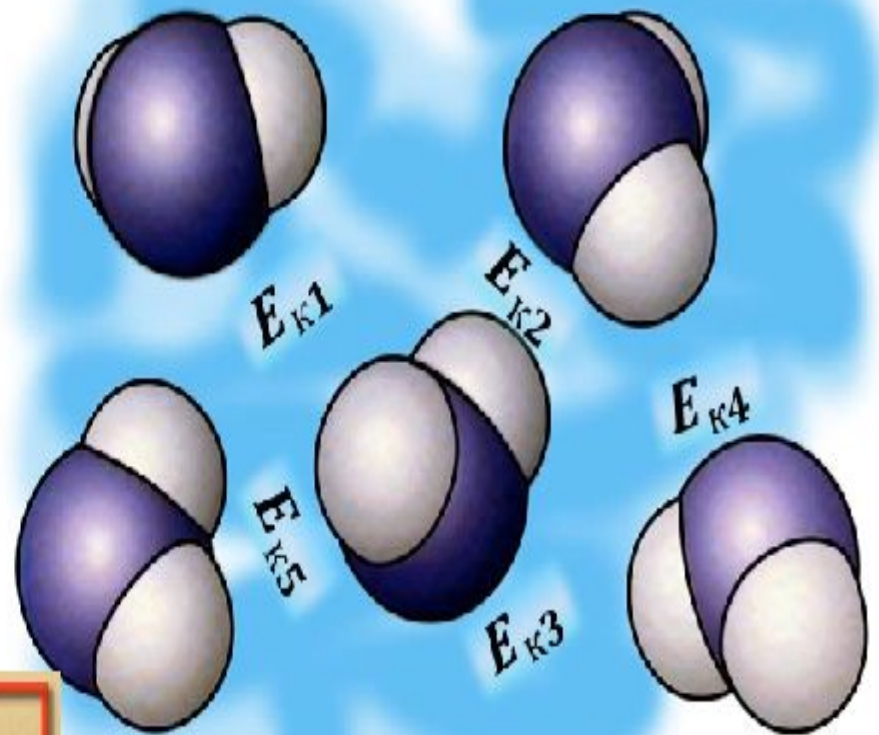
Внутренняя энергия идеального газа равна суммарной кинетической энергии всех частиц, входящих в тело.

$$U = E_K \quad \overline{E_K} = \frac{3}{2}kT$$

$$U = N\overline{E_K} \quad N = \nu N_A$$

$$U = \frac{3}{2}\nu N_A kT$$

$$U = \frac{3}{2}\nu RT$$



# Степень свободы

Степень свободы — это число возможных независимых движений частиц.

Внутренняя энергия многоатомного газа зависит от степени свободы:

$$U = \frac{i}{2} \nu RT$$

Где  $i$  — это степень свободы.

$i = 3$  для одноатомного газа;  
 $i = 5$  для двухатомного газа;  
 $i = 6$  для многоатомного газа



*Внутренняя энергия  
идеального одноатомного газа*

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

*Внутренняя энергия  
идеального двухатомного газа*

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT$$

Так как

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

- уравнение Менделеева–Клапейрона,

то внутренняя энергия:

$$U = \frac{3}{2} pV$$

- для одноатомного газа

$$U = \frac{5}{2} pV$$

- для двухатомного газа.

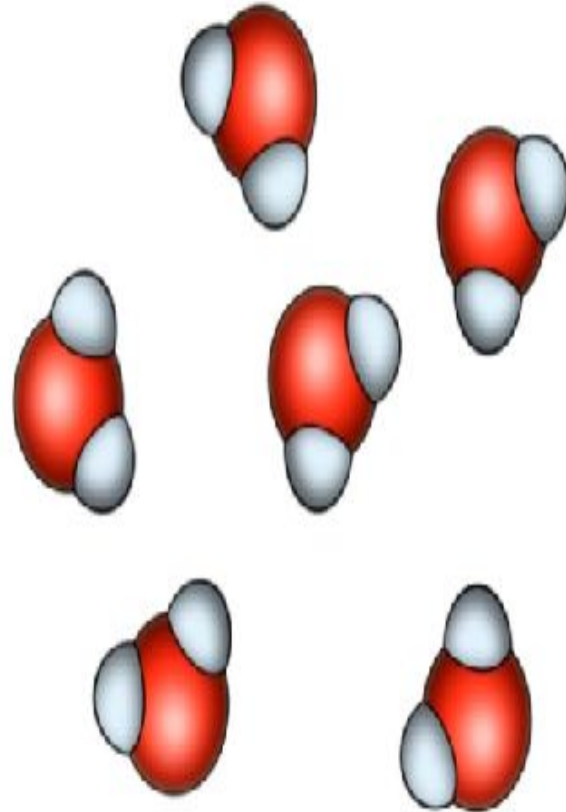
**В общем виде:**

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV$$

**где  $i$  – число степеней свободы молекул газа  
( $i = 3$  для одноатомного газа и  $i = 5$  для  
двухатомного газа)**



**Внутренняя энергия** реальных газов зависит от объёма, поскольку при сжатии расстояние между молекулами уменьшается, а, следовательно, увеличивается потенциальная энергия.



# Изменение внутренней энергии тела $\Delta U$

Совершение работы  $A$

Теплообмен  $Q$

теплопроводность

излучение

конвекция

над  $A = \Delta U$  самим

телом

телом

$\Delta U \blacktriangle$

$\Delta U \blacktriangledown$



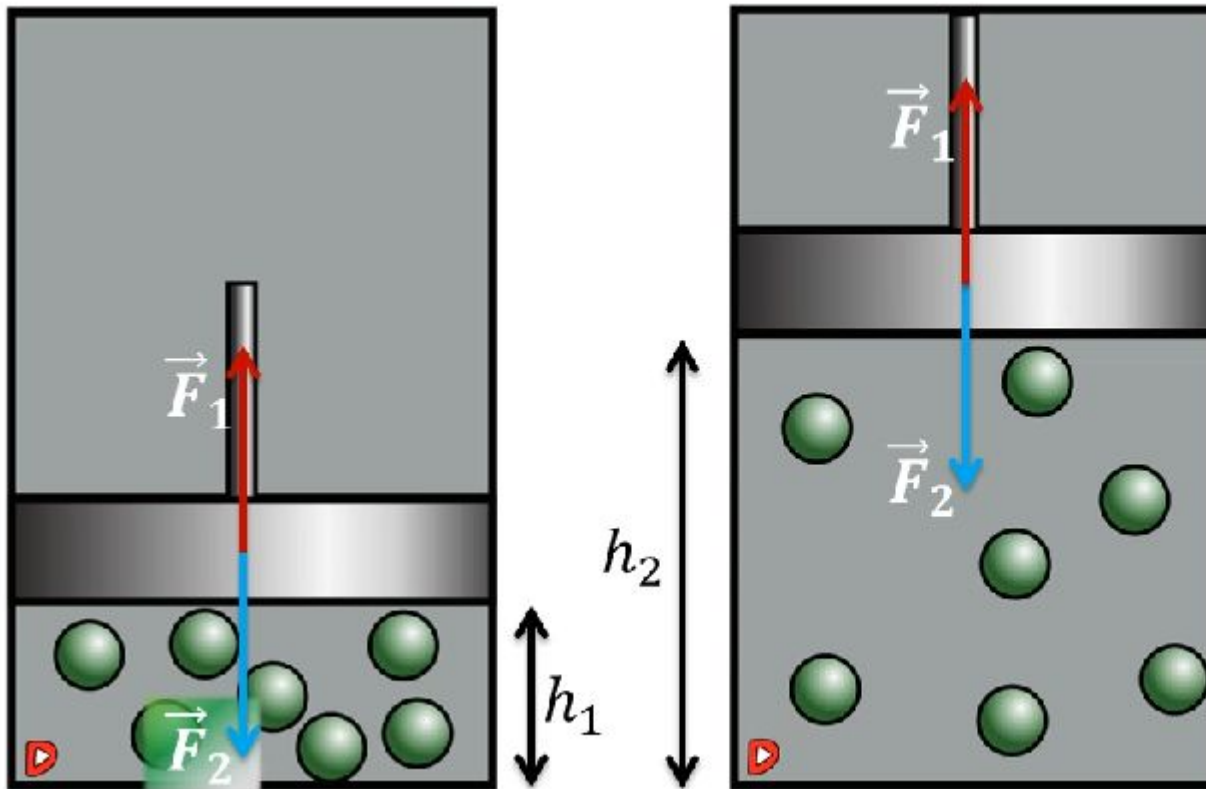
# Работа в термодинамике

- ▶ Работа газа:

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

- ▶ Работа внешних сил:

$$A = -A'$$



$$F_1 = F_2$$

$$P = \text{const}$$

$$F_1 = PS$$

$$A = F \Delta r \cos \alpha$$

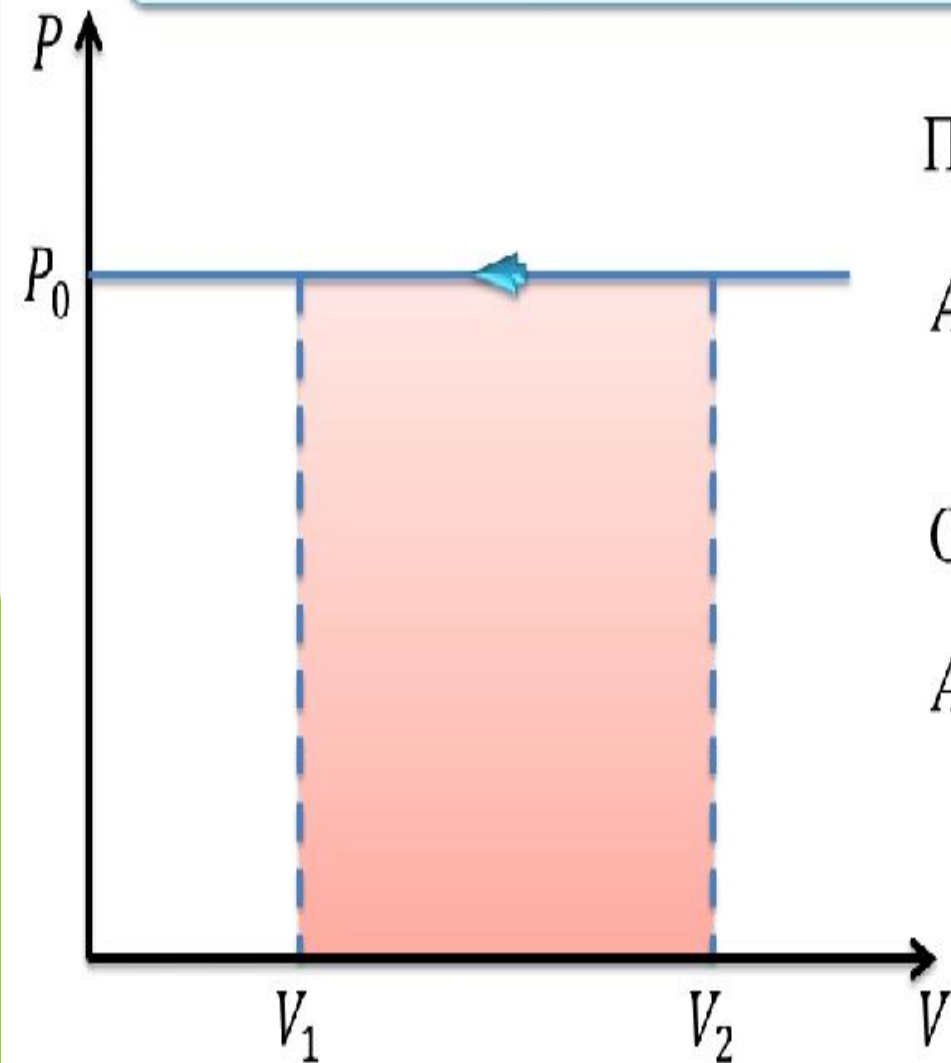
$$A = F_1 \Delta h$$

$$A = PS(h_2 - h_1)$$

$$A = P(V_2 - V_1)$$

$$A = P\Delta V$$

# Работа при изобарном процессе



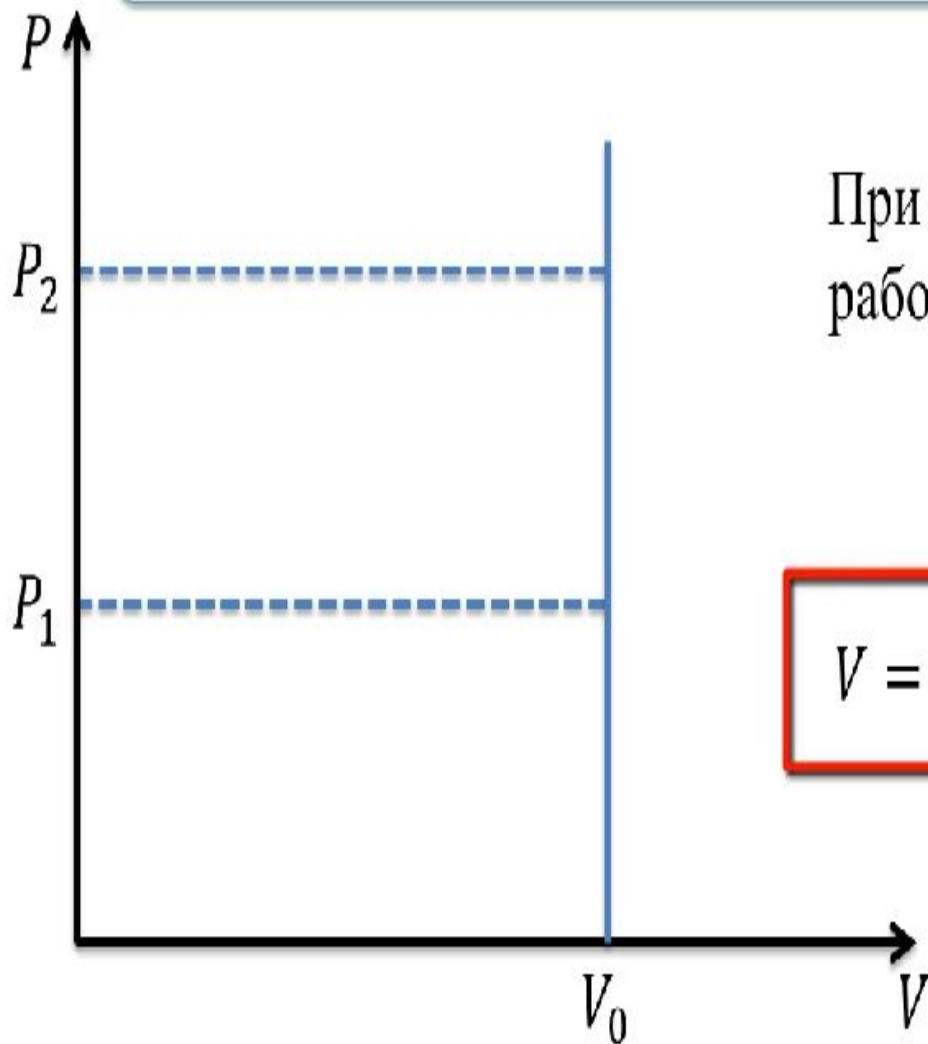
Положительная работа:

$$A = P_0(V_2 - V_1), \Delta V > 0$$

Отрицательная работа:

$$A = P_0(V_1 - V_2), \Delta V < 0$$

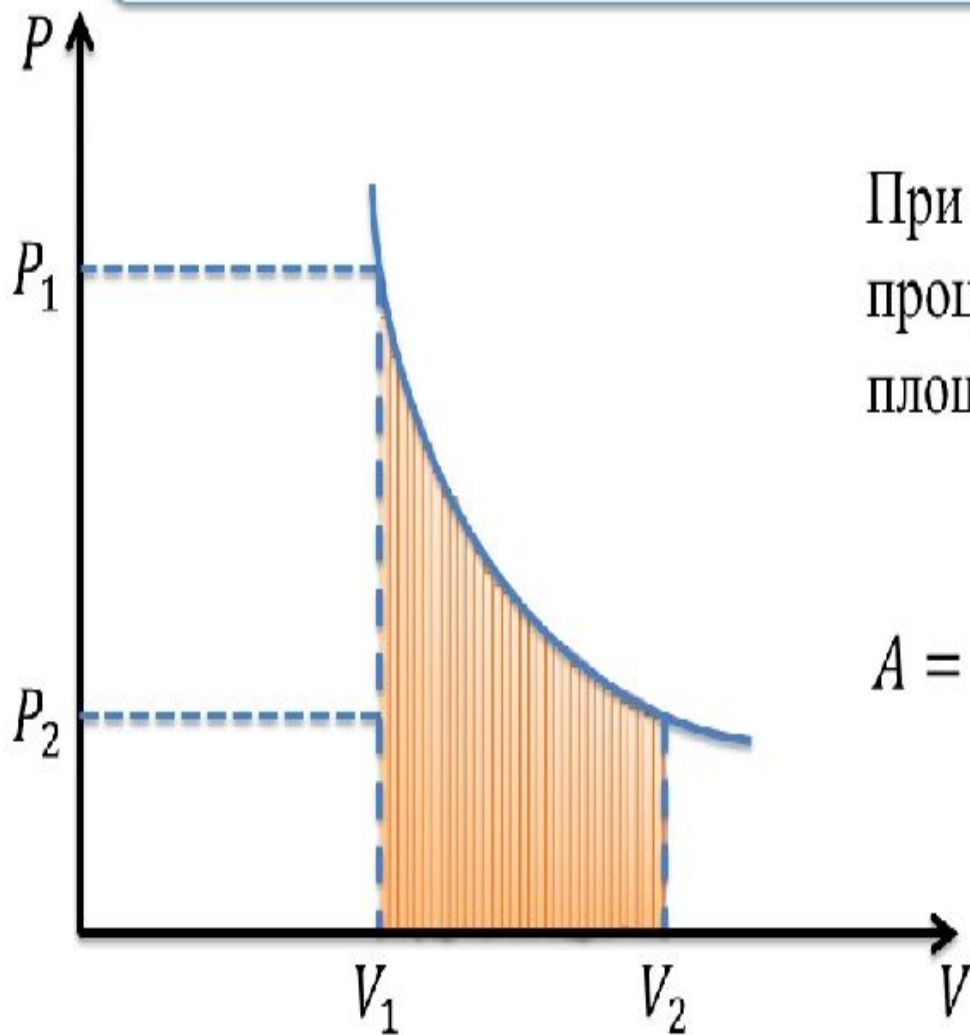
# Работа при изохорном процессе



При изохорном процессе  
работа газа равна нулю!

$$V = const \Rightarrow A = 0$$

# Работа при изотермическом процессе



При изотермическом процессе работа газа равна площади под графиком.

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV$$

# Основные выводы

- **Внутренняя энергия тела** — это суммарная потенциальная и кинетическая энергия всех частиц, входящих в тело:

$$U = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$$

- **Внутренняя энергия идеального одноатомного газа:**

$$U = \frac{3m}{2M} RT$$



# Основные выводы

- **Степень свободы** — это число возможных независимых движений частиц.
- **Внутренняя энергия многоатомного газа:**

$$U = \frac{i m}{2 M} RT,$$

где  $i$  — степень свободы.

# Основные выводы

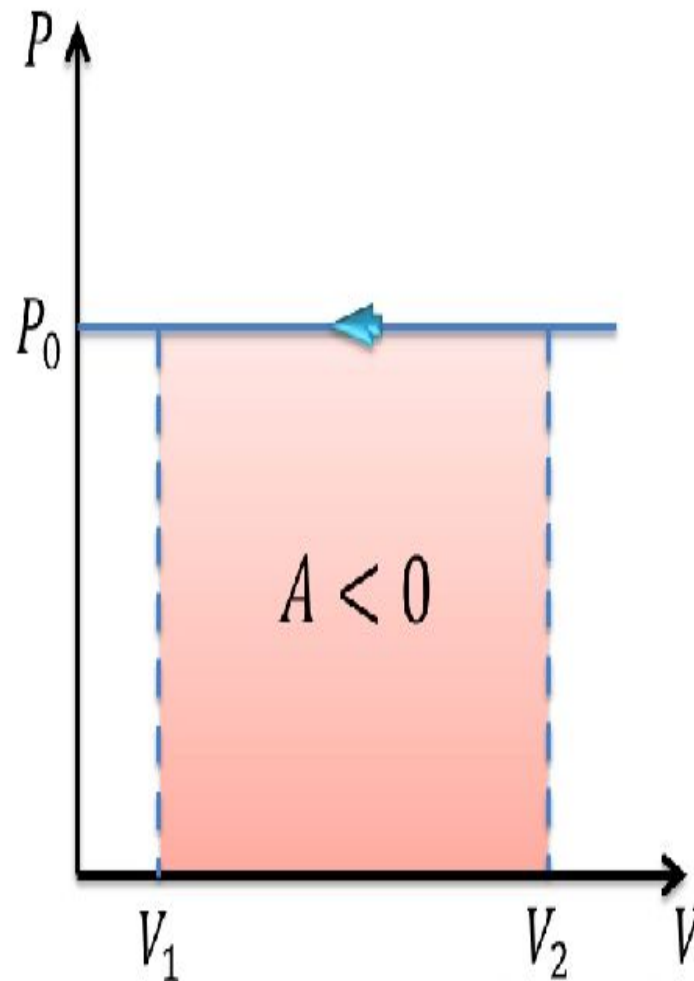
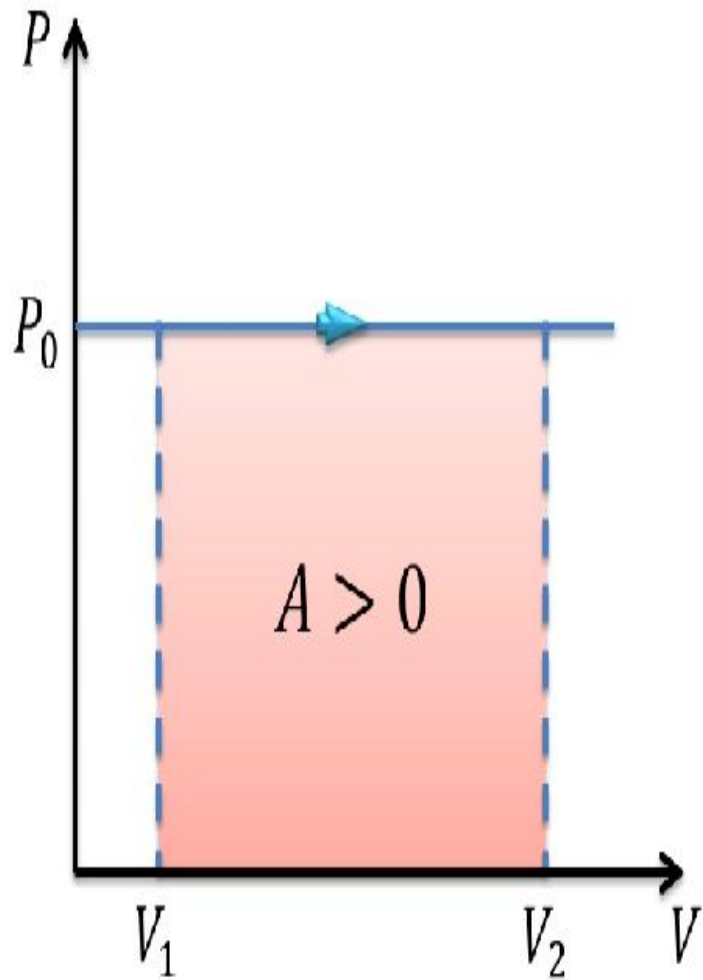
- Работа в термодинамике равна изменению внутренней энергии:

$$A = \Delta U$$

- Работа газа при изобарном сжатии или расширении:

$$A = P\Delta V$$

# Основные выводы

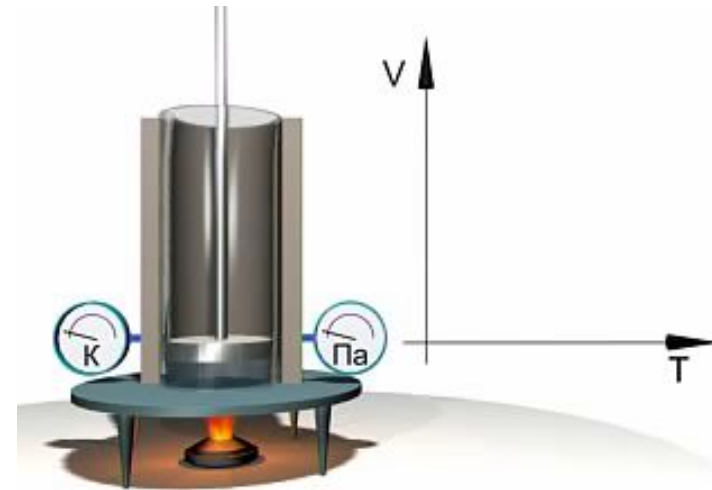


# I ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

(Закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам)

Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  системы равно сумме работы  $A$  совершенной внешними телами над системой, и сообщенного ей количества теплоты  $Q$ .

$$\begin{aligned} \Delta U &= A + Q \\ A^* &= -A \\ Q &= A^* + \Delta U \end{aligned}$$



Количество теплоты  $Q$ , переданное системе, расходуется на увеличение её внутренней энергии  $\Delta U$  и совершение системой работы  $A^*$  над внешними телами.

# *Первый закон термодинамики*

*Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе*

*Количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами*

$$\Delta U = A + Q$$

$$Q = \Delta U + A'$$

# ТЕРМОДИНАМИКА ИЗОПРОЦЕССОВ.

Процессы, происходящие при постоянном значении одного из параметров состояния (**T, V** или **P**) с данной массой газа называются изопроцессами.

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ

ИЗОХОРНЫЙ

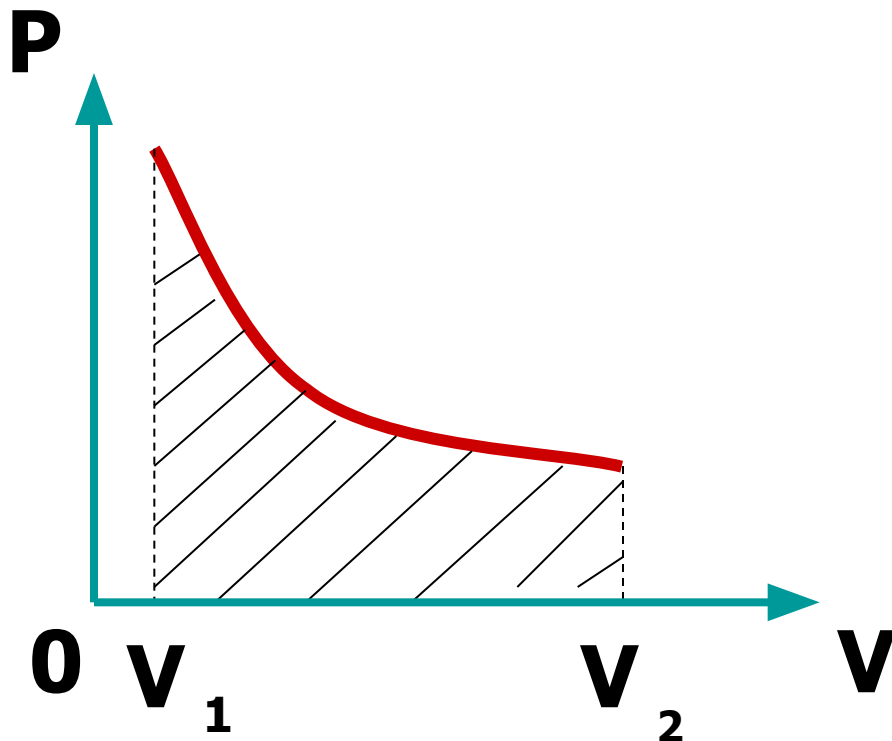
ИЗОБАРНЫЙ

АДИАБАТНЫЙ

# ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

- Процесс, происходящий при постоянной температуре.

$$T = \text{const}$$



$$\Delta U = 0$$

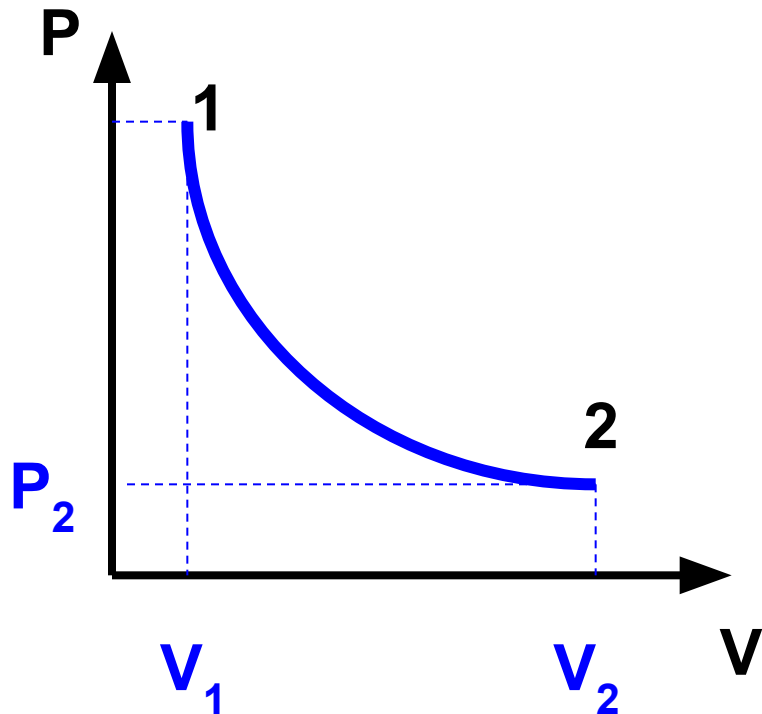
$$Q + A = 0$$

$$Q = -A = A^*$$



- При изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ ):

$$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



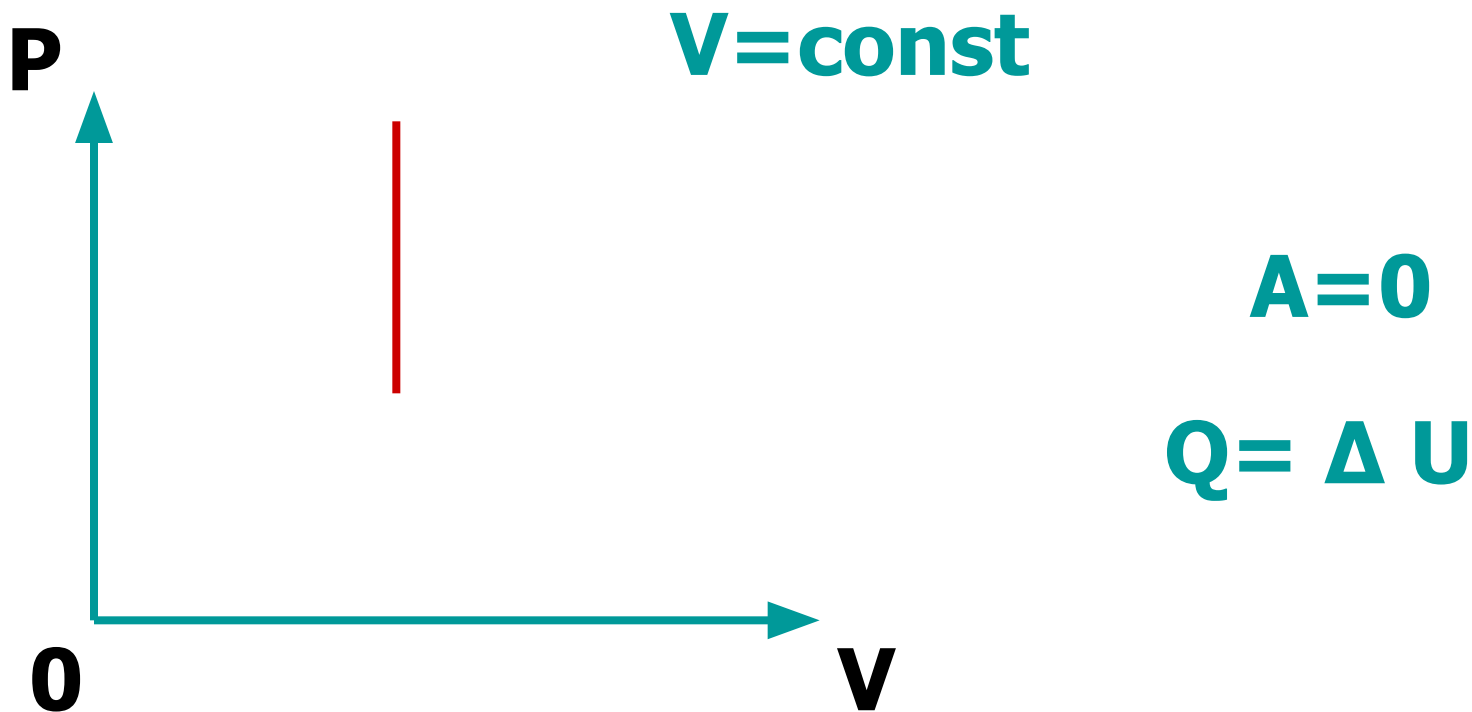
Изотермическое расширение

$$A' > 0$$



# ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

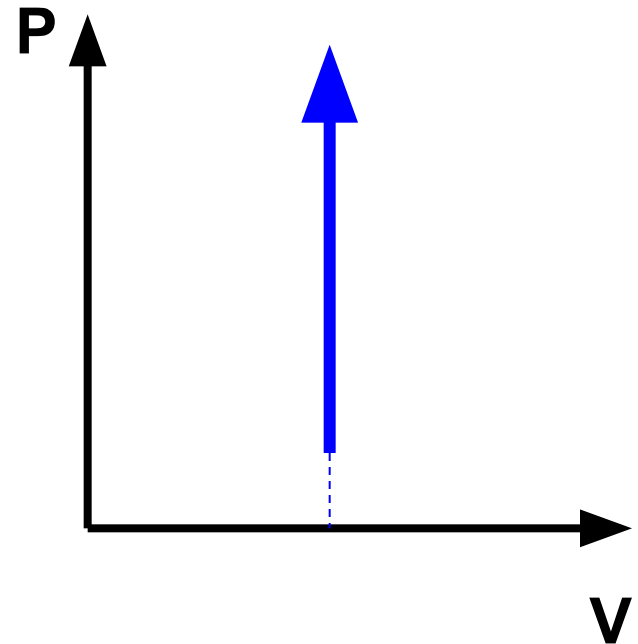
- Процесс, происходящий при постоянном объёме.



# Работа газа при изопроцессах

- При изохорном процессе ( $V = \text{const}$ ):  
 $\Delta V = 0$  работа газом не совершается:

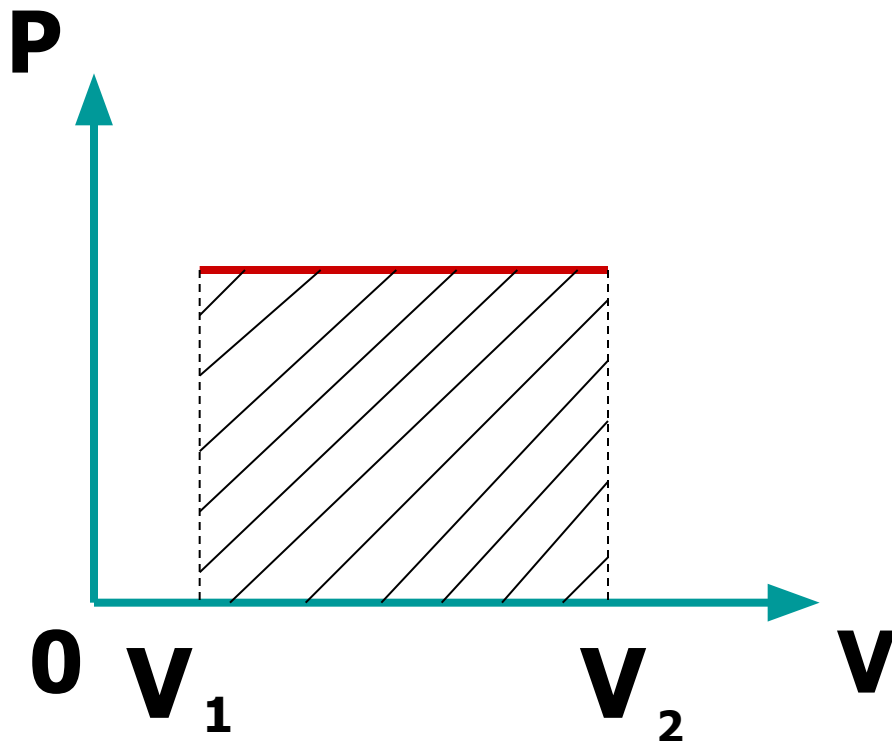
$$A' = 0$$



Изохорное нагревание

# ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

- Процесс, происходящий при постоянном давлении.



$$A^* = p (v_2 - v_1)$$

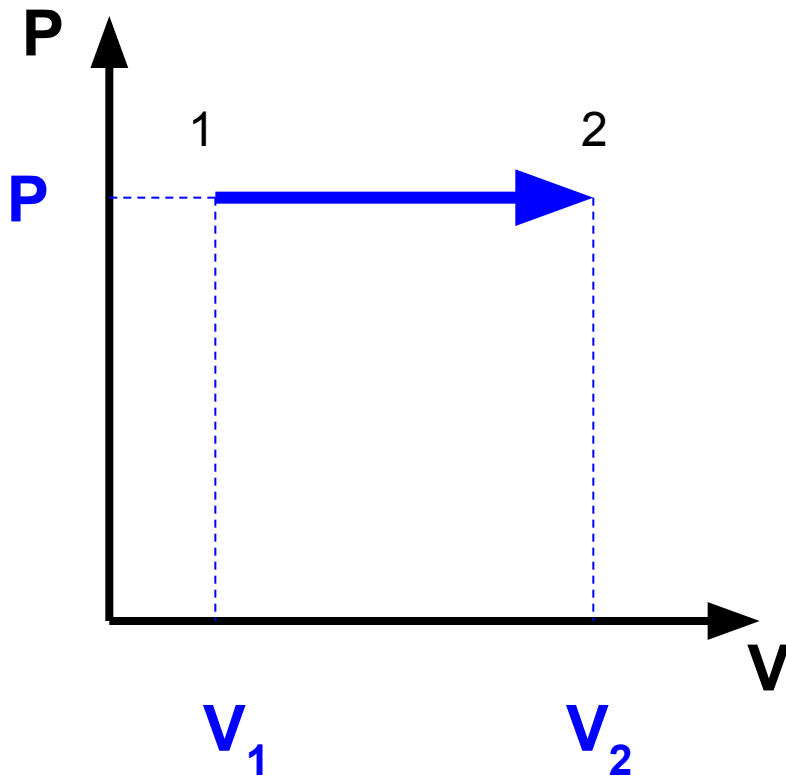
$$\Delta U = A + Q$$

$$Q = A^* + \Delta U$$



- При изобарном процессе ( $P=\text{const}$ ):

$$A' = p \Delta V$$

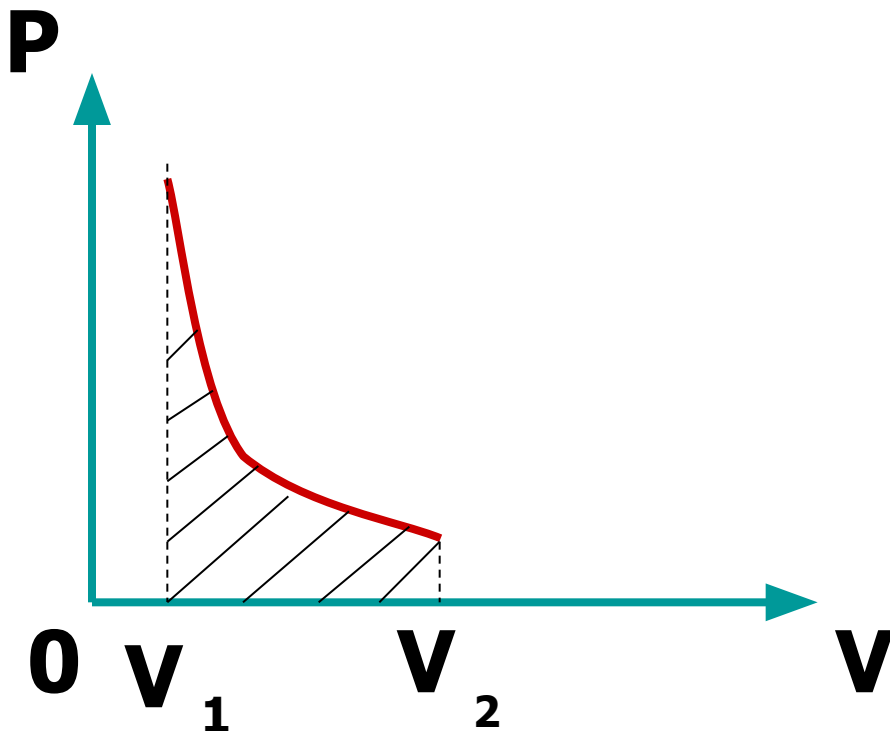


Изобарное расширение

$$A' > 0$$

# АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

- Процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой. (Обычно отсутствие теплообмена обусловлено быстротой процесса: теплообмен не успевает произойти)

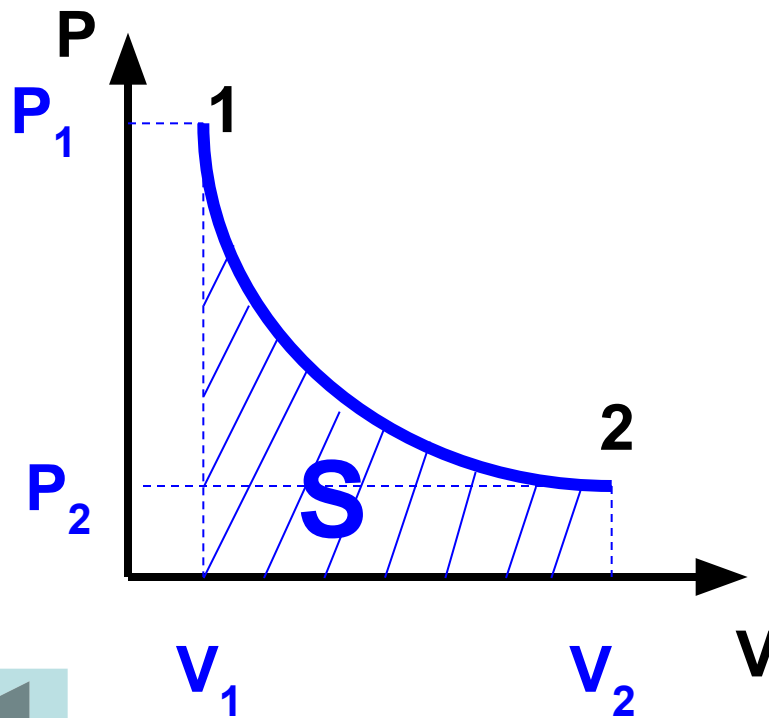
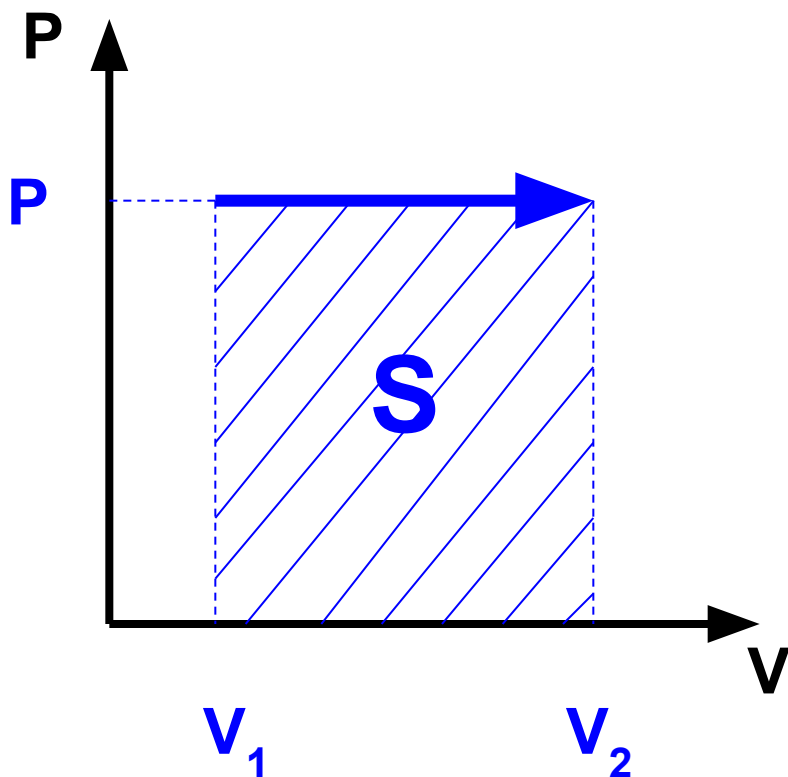


$$Q=0$$
$$\Delta U = -A^*$$



# Геометрическое истолкование работы:

Работа, совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой, изображающей изменение состояния газа на диаграмме  $(p, V)$ .



# **Количество теплоты** – часть внутренней энергии, которую тело получает или теряет при теплопередаче

Процесс	формула	
Нагревание или охлаждение	$Q = cm\Delta T$	$c$ – удельная теплоёмкость вещества [ Дж/кг $^{\circ}$ К], $m$ – масса [кг], $\Delta T$ – изменение температуры [ $^{\circ}$ К].
Кипение или конденсация	$Q = rm$	$r$ – удельная теплота парообразования [ Дж/кг ]
Плавление или кристаллизация	$Q = \lambda m$	$\lambda$ - удельная теплота плавления вещества [ Дж/кг ]
Сгорание топлива	$Q = qm$	$q$ – удельная теплота сгорания топлива [ Дж/кг ]



# Применение первого закона термодинамики к различным процессам

Процесс	Постоянный параметр	Первый закон термодинамики
Изохорный	$V = \text{const}$	$\Delta U = Q$
Изотермический	$T = \text{const}$	$Q = A'$
Изобарный	$P = \text{const}$	$Q = \Delta U + A'$
Адиабатный	$Q = \text{const}$	$\Delta U = -A'$





## II ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Не возможно перевести теплоту от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

Не возможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.

Не возможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела более нагретому.

**Тепловые процессы необратимы.**

**Тепловые двигатели –  
устройства, превращающие  
внутреннюю энергию топлива в  
механическую.**

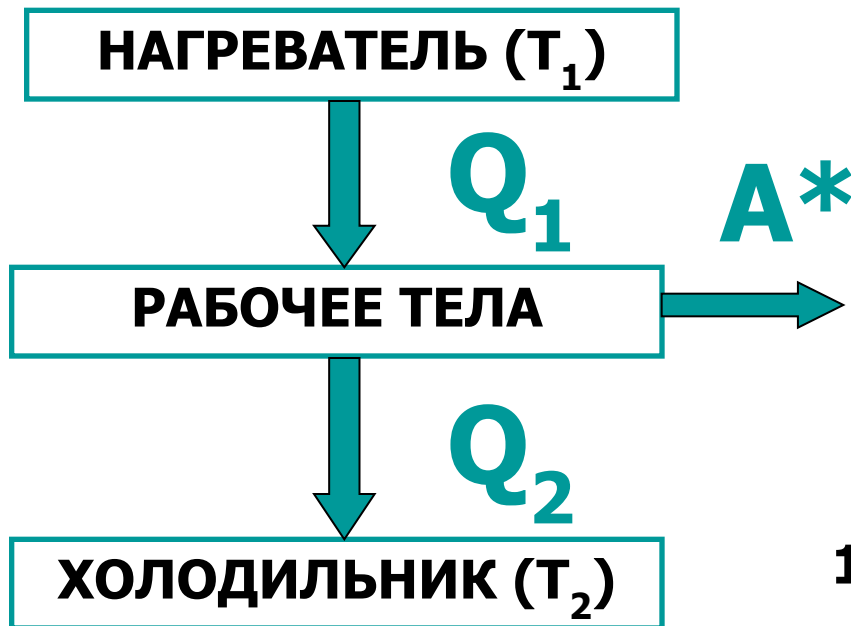
**Виды тепловых двигателей**



# ТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ –

## ГЛАВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- Периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет полученной извне теплоты.



$$A^* = Q_1 - Q_2$$

Виды двигателей:

1. Паровая и газовая турбины
2. Карбюраторный двс
3. Дизель двс
4. Ракетный двигатель

# Принцип действия тепловых двигателей



$T_1$  – температура нагревателя

$T_2$  – температура холодильника

$Q_1$  – количество теплоты, полученное от нагревателя

$Q_2$  – количество теплоты, отданное холодильнику

# *Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя –*

**отношение работы  $A'$ , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:**

$$\eta = \frac{A'}{Q_1}$$

где  $A' = Q_1 - |Q_2|$  - работа, совершаемая двигателем

тогда 
$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

$$\eta < 1$$

КПД всегда меньше единицы, так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику

При  $T_1 - T_2 = 0$  двигатель не может работать

**Максимальное значение КПД  
тепловых двигателей (цикл Карно):**

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Отрицательные последствия использования тепловых двигателей:

- Потепление климата
- Загрязнение атмосферы
- Уменьшение кислорода в атмосфере

Решение проблемы:

- Вместо горючего использовать сжиженный газ.
- Бензин заменить водородом.
- Электромобили.
- Дизели.
- На тепловых электростанциях использовать скрубберы, в которых сера связывается с известью.
- Сжигание угля в кипящем слое.



**КПД тепловых двигателей**

<b>Двигатель</b>	<b>КПД, %</b>
Паровая машина	<b>1</b>
Паровоз	<b>8</b>
Карбюраторный двигатель	<b>20 - 30</b>
Газовая турбина	<b>36</b>
Паровая турбина	<b>35 - 46</b>
Ракетный двигатель на жидком топливе	<b>47</b>

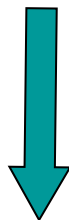


# ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ



## Первого рода

**Будучи раз пущен  
в ход, совершал  
бы работу  
неограниченно  
долгое время, не  
заимствуя  
энергию извне**



Противоречит закону  
сохранения и  
превращения энергии



## Второго рода

**Целиком  
превращал бы в  
работу теплоту,  
извлекаемую из  
окружающих тел**



Противоречит  
второму началу  
термодинамики

**НЕВОЗМОЖНЫ**

# ТЕРМОДИНАМИКА И ПРИРОДА

**В окружающей нас природе термодинамически обратимых процессов нет.**

**Энтропия** в термодинамически не обратимых процессах, протекающих в изолированной системе, возрастает.

По определению А. Эддингтона, возрастание энтропии, определяющей необратимые процессы есть «стрела времени»: чем выше энтропия системы, тем больше временной промежуток прошла система в своей эволюции.

Возрастание энтропии вселенной должно привести к тому, что температура всех тел сравняется т. е. наступит тепловое равновесие и все процессы прекратятся, наступит «тепловая смерть Вселенной». (Выводы второго закона термодинамики не всегда имеют место в природе и его нельзя применить ко всем существующим процессам).

# Тест по ТЕРМОДИНАМИКЕ

1. На сколько отделов делится термодинамика как предмет?  
а) на три                      в) на пять  
б) на четыре                г) на шесть
2. Кем была предложена температурная шкала, которой мы пользуемся в повседневной жизни?  
а) Кельвином                в) Карно  
б) Цельсием                г) Джоулем
3. Что изучает термодинамика?  
а) тепловые процессы                в) звуковые явления  
б) движение молекул                г) механические явления
4. Термодинамическая система, которая не взаимодействует с другими системами называется:  
а) закрытой                в) статической  
б) изолированной                г) открытой
5. Процессы, происходящие при постоянной температуре называются:  
а) адиабатными                в) изобарными  
б) изотермическими                г) изохорными

# Тест по ТЕРМОДИНАМИКЕ

(продолжение)

6. При каком изопроцессе работа не совершается?  
а) при изотермическом      в) адиабатном  
б) изохорном      г) изобарном
7. Согласно второму началу термодинамики тепловые процессы:  
а) обратимы      в) необратимы  
б) изолированы      г) закрыты
8. Какой двигатель не является тепловым?  
а) паровая турбина      в) ракетный двигатель  
б) водяная турбина      г) дизель
9. Энтропия в термодинамически необратимых процессах:  
а) возрастает      в) не изменяется  
б) уменьшаются      г) равна нулю
10. Тепловая смерть Вселенной наступит, если:  
а) температура всех тел сравняется;  
б) температура всех тел станет равной нулю;  
в) температура всех тел будет повышаться;  
г) температура всех тел будет понижаться.

Расширяясь при постоянном давлении, газ совершил работу, равную 10 кДж. Если начальный объём газа равен 5 л, а конечный объём — 10 л, определите, при каком давлении происходил данный процесс. Также изобразите процесс графически.

Дано:

$$P = const$$

$$A = 10^4 \text{ Дж}$$

$$V_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 10^{-2} \text{ м}^3$$

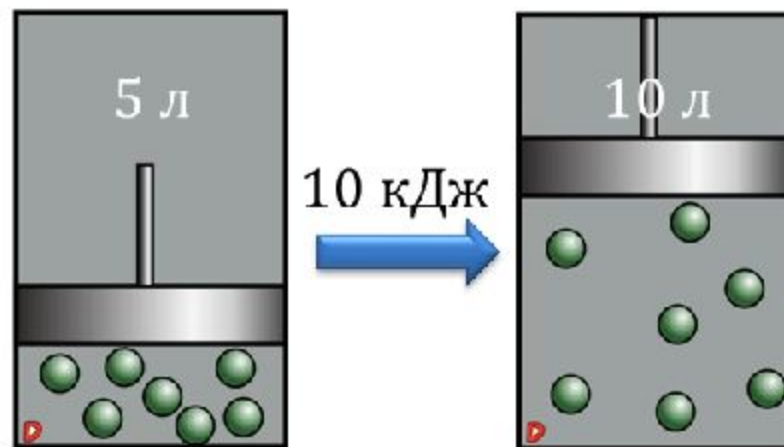
---

$$P = ?$$

$$A = P\Delta V$$

$$P = \frac{A}{\Delta V}$$

$$P = \frac{A}{V_2 - V_1} = \frac{10^4}{10^{-2} - 5 \times 10^{-3}} = 2 \text{ МПа}$$



Расширяясь при постоянном давлении, газ совершил работу, равную 10 кДж. Если начальный объём газа равен 5 л, а конечный объём — 10 л, определите, при каком давлении происходил данный процесс. Также изобразите процесс графически.

Дано:

$$P = \text{const}$$

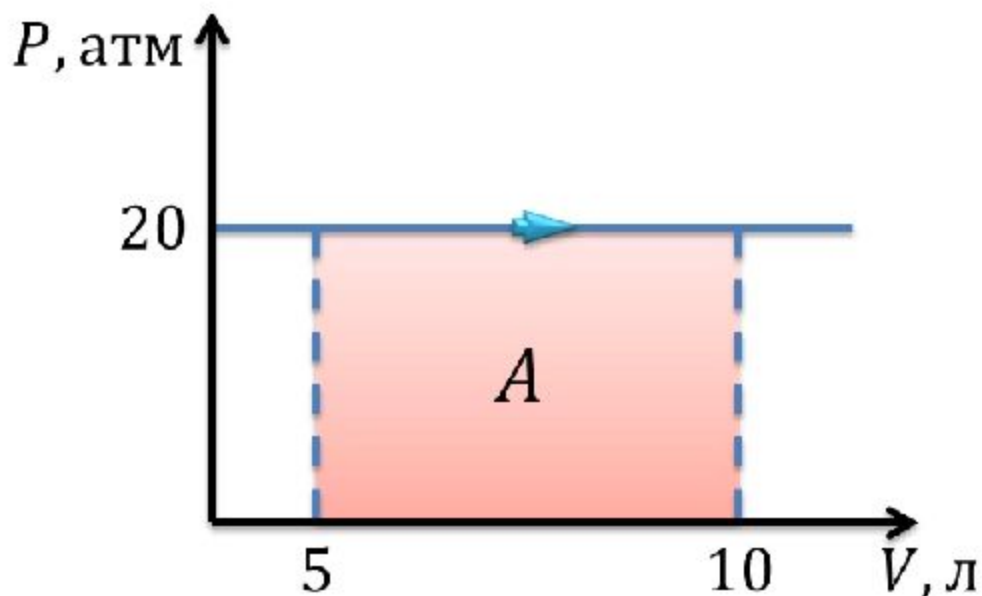
$$A = 10^4 \text{ Дж}$$

$$V_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 10^{-2} \text{ м}^3$$

---

$$P = ?$$



Гелий массой 15 г нагревается от 300 К до 400 К. Найдите работу, совершенную при этом процессе, считая гелий одноатомным идеальным газом.

Дано:

$$m = 0,015 \text{ кг}$$

He

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 400 \text{ К}$$

---

A - ?

$$U = \frac{3m}{2M} RT$$

$$A = \Delta U = \frac{3m}{2M} R \Delta T$$



$$M = 0,004 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$A = \frac{3 \times 0,015}{2 \times 0,004} \times 8,31(400 - 300) = 4674 \text{ Дж}$$



# ***Литература***

- 1. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н. Физика 10 класс. – М.: Просвещение.**
- 2. Касьянов В.А. Физика 10 класс. – М.: Дрофа, 2006. – 410 с.**
- 3. Волков В.А. Поурочные разработки по физике. 10 класс. – М: Вако, 2006. – 400 с.**
- 4. Касаткина И.Л., Ларцева Н.А., Шкиль Т.В. Репетитор по физике. В 2-х томах. Том 1. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1995. – 863 с.**
- 5. [www: fiz.1september.ru](http://www.fiz.1september.ru)**