Лекции по термодинамике
доцент каф. Э6, ктн Рыжков С.В.

Энергомашиностроение.
Э6

Лекция №3
Свойства идеальных газов

- Закон Бойля-Мариотта.
- Закон Гей-Люссака.
- Уравнения состояния идеального газа.
- Термодинамическая поверхность состояния.
- Рабочие координаты.
- Закон Авогадро.
- Вычисление газовой постоянной.

Идеальный газ – газ, который подчиняется уравнению состояния идеального газа.

Идеальным газом называют такой газ, в котором нет сил взаимного притяжения между молекулами, а их объем равен нулю

Идеальный газ – предельный случай реального газа при ρ стремящимся к 0.

Закон Бойля - Мариотта

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

или

$$p_1V_1 = p_2V_2 = const$$

для одного килограмма

$$p_1\upsilon_1 = p_2\upsilon_2 = const$$

т.е.

$$p\upsilon = const \qquad (1)$$

Уравнение (1) есть уравнение равнобокой гиперболы, которая показана на рис. 1. Эту кривую называют также ***изотермой***, т. е. кривой постоянной температуры.

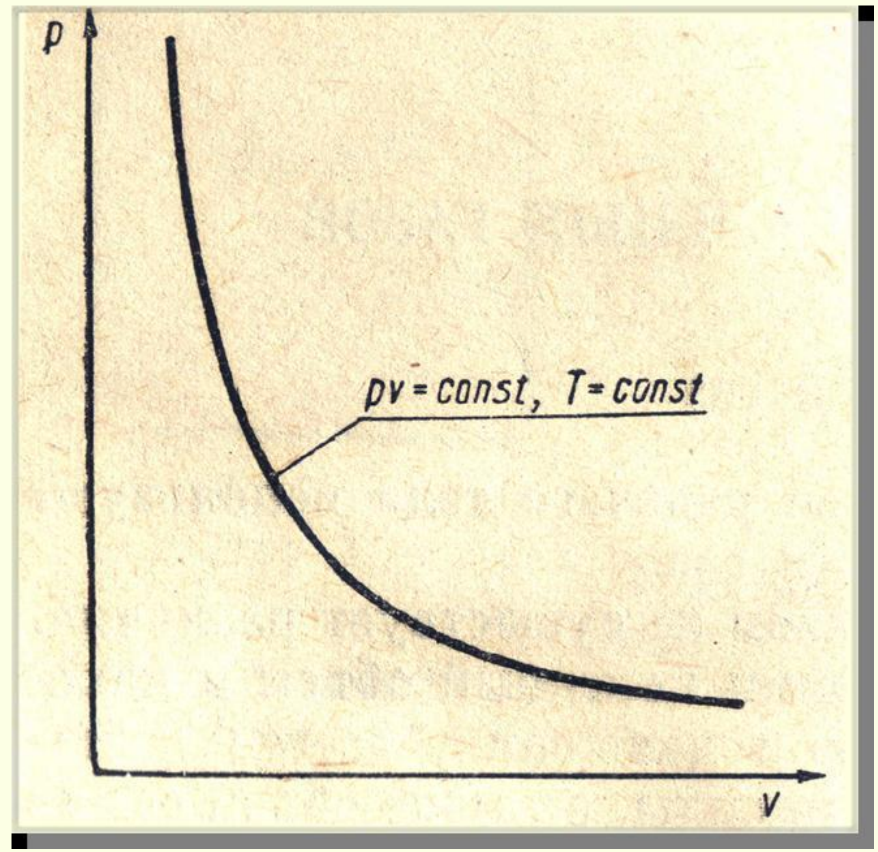

Рис. 1. График закона Бойля – Мариотта

Закон Гей-Люссака

$$\upsilon = \upsilon_0 + \beta t \upsilon_0 = \upsilon_0(1 + \beta t)$$

где υ_0 — объем газа при температуре 0° С; β = 1/273 — коэффициент объемного или термического расширения газа.

Закон Гей-Люссака принято выражать через удельный объем газа υ и абсолютную температуру *T:*

$$\frac{\upsilon}{T} = const \qquad (2)$$

Согласно уравнению (2) содержание закона Гей-Люссака можно сформулировать следующим образом: ***изменение объема постоянного количества идеального газа при неизменном давлении прямо пропорционально изменению абсолютной температуры.***

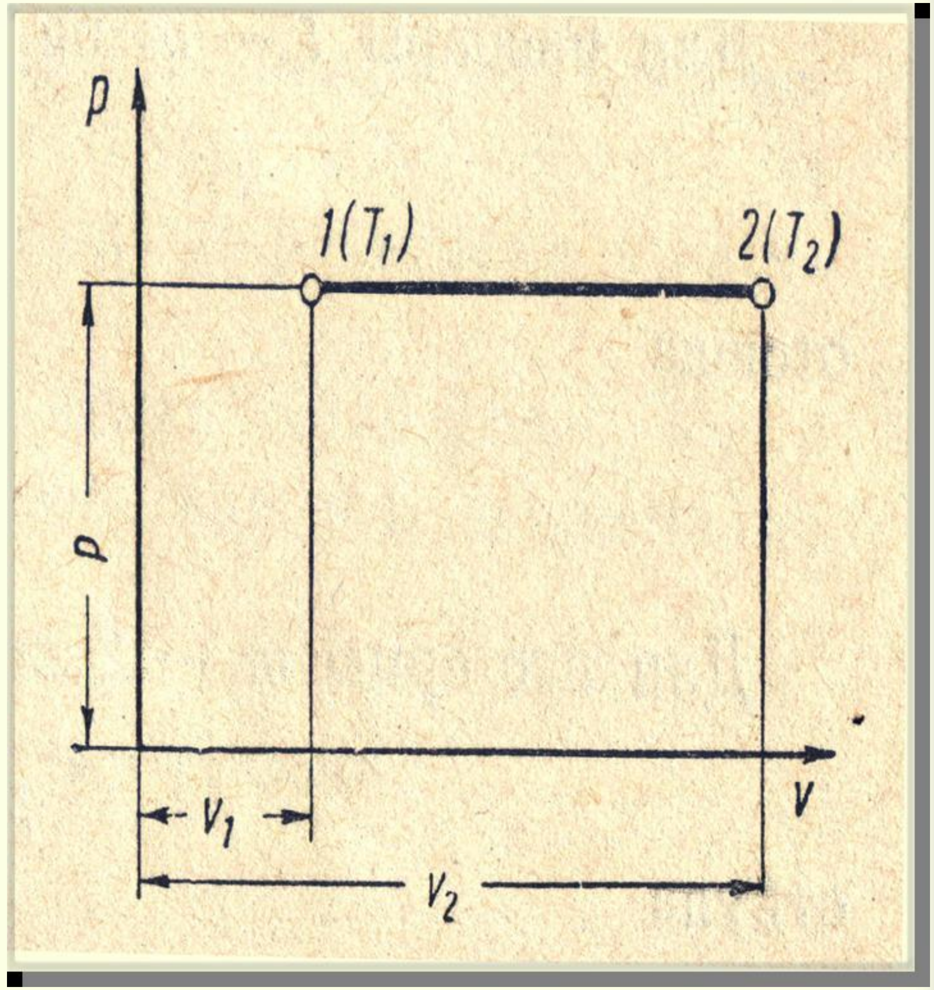

Рис. 2. График закона Гей-Люссака

На рис. 2 закон Гей-Люссака показан графически в координатах *vp.* Так как обязательным условием закона является постоянство давления, то в указанных координатах это будет прямая линия, параллельная оси *v.* Эту линию называют также ***изобарой***, т. е. линией постоянного давления.

Уравнение состояния идеального газа

$$T = f_3(p,\upsilon) \qquad (3)$$

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_m} = \frac{T_1}{T_m}$$

$$\upsilon_m = \frac{\upsilon_1 T_m}{T_1}$$

$$p_m \upsilon_m = p_2 \upsilon_2$$

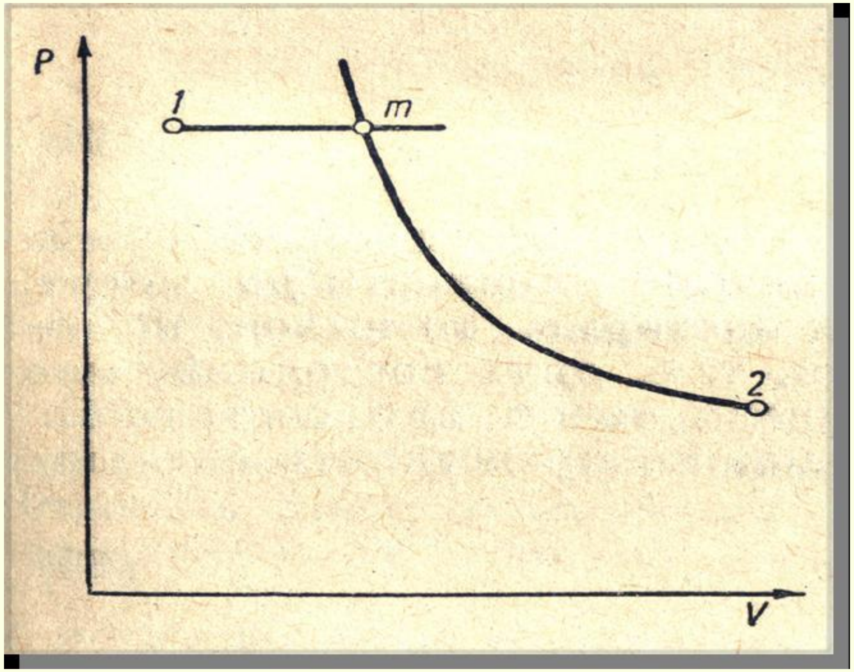

Рис. 3. Вывод уравнения состояния идеального газа

$$\upsilon_m = \frac{p_2 \upsilon_2}{p_m}$$

$$\frac{\upsilon_1 T_m}{T_1} = \frac{p_2 \upsilon_2}{p_m}$$

$$p_m = p_1 \qquad T_m = T_2$$

$$\frac{\upsilon_1 T_2}{T_1} = \frac{p_2 \upsilon_2}{p_1}$$

$$\frac{p_1 \upsilon_1}{T_1} = \frac{p_2 \upsilon_2}{T_2} \tag{4}$$

Эту константу принято обозначать буквой *R* и называть ***удельной газовой постоянной.*** Тогда уравнение состояния для идеального газа принимает следующий вид:

$$p\upsilon = RT \tag{5}$$

Уравнение (5) справедливо для 1 *кг* газа. Для произвольного количества газа уравнение состояния будет

$$pV = mRT \tag{6}$$

$$V = m\upsilon$$

Уравнение (6) связывает все три параметра; оно называется ***уравнением состояния идеального газа*** и известно как уравнение Клапейрона — оно названо по имени французского ученого, который впервые его вывел.

Дифференциальная форма уравнения Клапейрона

$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T} \tag{7}$$

Термодинамическая поверхность состояния

Из математики известно, что уравнение

$$F(p,\upsilon,T)=0$$

является уравнением поверхности в пространственной системе координат p, υ, *T*. Эта поверхность называется термодинамической поверхностью состояния.

Рабочие координаты

$$\Delta l = P\Delta h$$

Но внешняя сила *P* согласно условию равновесия сил, действующих на поршень, определяется как

$$P = pF$$

Тогда

$$\Delta l \approx pF\Delta h \approx p\Delta\upsilon \qquad (8)$$

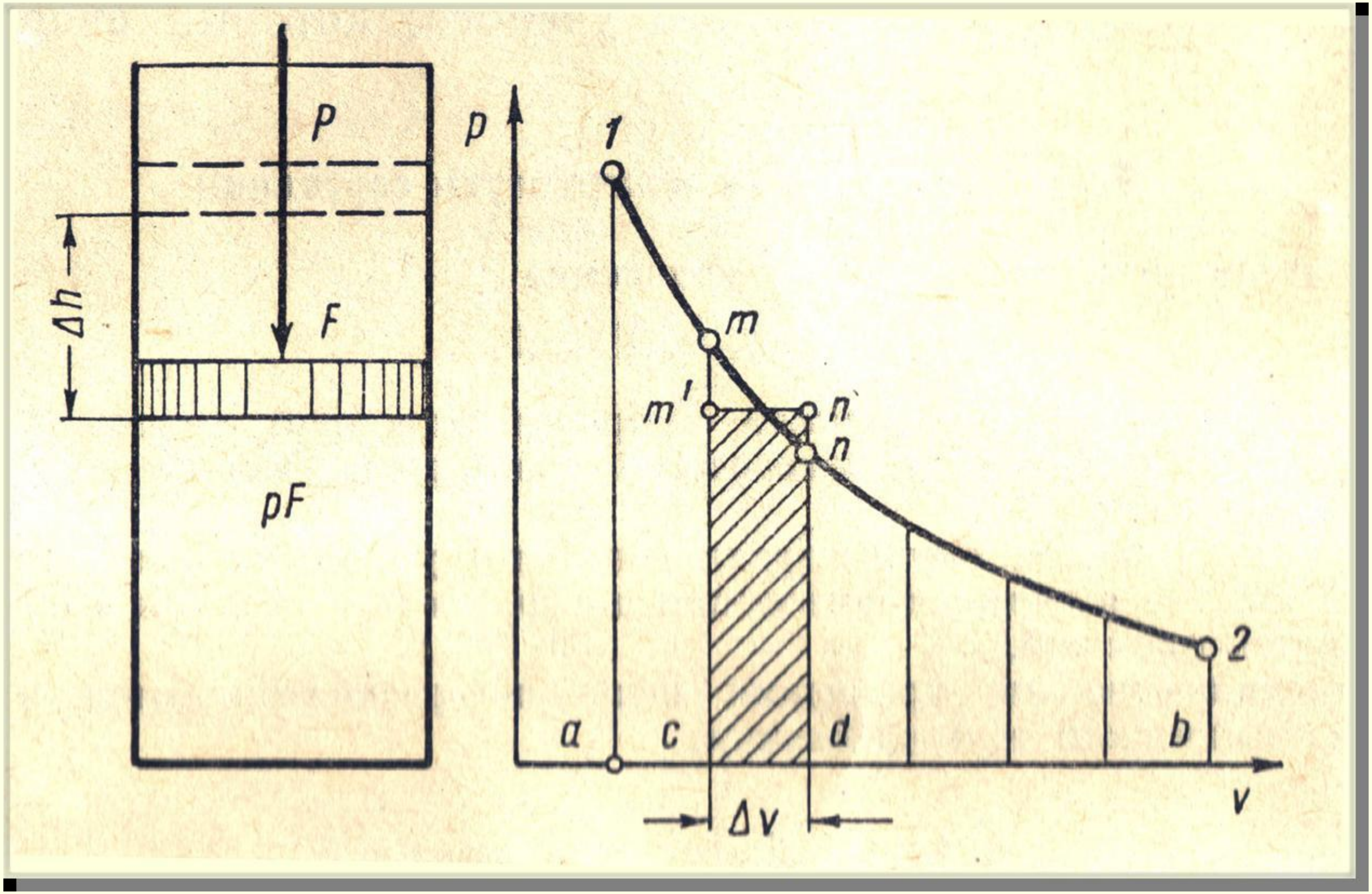

Рис. 4. Определение работы процесса в координатах υp

Таким образом, при переходе рабочего тела на состояния, соответствующего точке т, в состояние n производится внешняя работа, равная приближенно произведению средней величины давления на приращение объема, т. е. площадке прямоугольника

$$c - m' - n' - d$$

Разбив весь процесс *1—2* на ряд участков, вычислив для каждого из них площадь прямоугольника и просуммировав их, получим приближенное значение всей работы процесса *1—2:*

$$l = \sum \Delta l = \sum p \Delta \upsilon$$

$$l = \int_1^2 dl = \int_1^2 p d\upsilon \qquad (9)$$

$$l = p(\upsilon_2 - \upsilon_1) \qquad (10)$$

Координаты *vp* принято называть *рабочими.*

$$p\upsilon_1 = RT_1$$

$$p\upsilon_2 = RT_2$$

$$p(\upsilon_2 - \upsilon_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$R = \frac{p(\upsilon_2 - \upsilon_1)}{T_2 - T_1} \qquad (11)$$

Удельная газовая постоянная *R* есть работа, которую совершает 1 *кг* идеального газа в процессе *p* = const при изменении его температуры на 1°. Размерность *R* определяется уравнением (11).

Закон Авогадро

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad (12)$$

$$\frac{\frac{m_1}{V}}{\frac{m_2}{V}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad (13)$$

Так как ρ = 1/υ , то последнее уравнение можно написать в следующем виде:

$$\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad или \quad \upsilon_1\mu_1 = \upsilon_2\mu_2 = \upsilon_\mu = 22,4\, м^3/кмоль \qquad (14)$$

Киломолем (кмоль) v называется количество вещества, масса которого в килограммах численно равна его относительной молекулярной массе.

По известному значению молекулярной массы идеального газа μ можно найти его удельный объем *v* и плотность ρ при нормальных физических условиях ($\rho_н$ и $v_н$)*:*

$$\upsilon_н = \frac{22,4}{\mu} \quad м^3/кг \qquad (15)$$

$$\rho_н = \frac{\mu}{22,4} \quad кг/м^3 \qquad (16)$$

Вычисление газовой постоянной

Умножим обе части уравнения состояния идеального газа на молекулярную массу, т. е. напишем это уравнение для m *кг* газа:

$$p\upsilon\mu = \mu RT \tag{17}$$

но μυ = $V_\mu = \upsilon_\mu$ — объем 1 *кмоль* газа, а μR по смыслу является газовой постоянной 1 *кмоль* газа, и поэтому эту величину можно обозначить через R_μ. Тогда уравнение (17) принимает вид

$$p\upsilon_\mu = R_\mu T \tag{18}$$

Газовую постоянную, отнесенную к 1 *кмоль,* называют ***универсальной газовой постоянной***. По физическому смыслу универсальная постоянная представляет собой работу, которую совершает 1 *кмоль* любого идеального газа при увеличении его температуры на 1° в процессе *p* = const.

Зная универсальную газовую постоянную нетрудно определить газовую постоянную 1 *кг* любого газа; для этого нужно знать его молекулярную массу:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314,3}{\mu} \quad Дж/(кг \cdot град) \quad Дж/(кг \cdot К)$$

Умножив обе части равенства ν — число киломолей газа, получим

$$p\upsilon_\mu \nu = \nu R_\mu T$$

Контрольные вопросы

- Закон Бойля-Мариотта.
- Закон Гей-Люссака.
- Определение работы процесса в координатах *vp*
- Уравнения состояния идеального газа.
- Дифференциальная форма уравнения Клапейрона
- Термодинамическая поверхность состояния.
- Рабочие координаты.
- Закон Авогадро.
- Вычисление газовой постоянной.