

Энергомашиностроение.

6

Лекция №21

Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей

- Схема рабочего процесса газовой турбины. Газотурбинная установка.
- Идеальные циклы газотурбинной установки.
- Пути повышения экономичности идеальных циклов газотурбинных установок.
- Циклы воздушно-реактивных двигателей.
- Циклы жидкостных реактивных двигателей.

Схема рабочего процесса газовой турбины. Газотурбинная установка

Газовая турбина относится к классу так называемых **лопаточных машин**. В ней рабочее тело - газ, имеющий высокую температуру и давление, расширяется в специальных каналах 3 (рис. 1), называемых соплами. В результате расширения газ приобретает большую скорость.

Газотурбинная установка, работающая по циклу со сгоранием топлива при постоянном давлении (рис 1).

- 1-2 – компрессор
- 3 – сопло
- 4 – вывод в атмосферу
- 5 – рабочие лопатки
- 6 – диск
- 7 – вал

- 1-2 – адиабатное сжатие в компрессоре
- 2-3 – сгорание топлива при $P=\text{const}$, газ расширяется в специальных каналах 3 (сопла)
- 3-4 – адиабатное расширение; в т.4 удаляется из установки в атмосферу

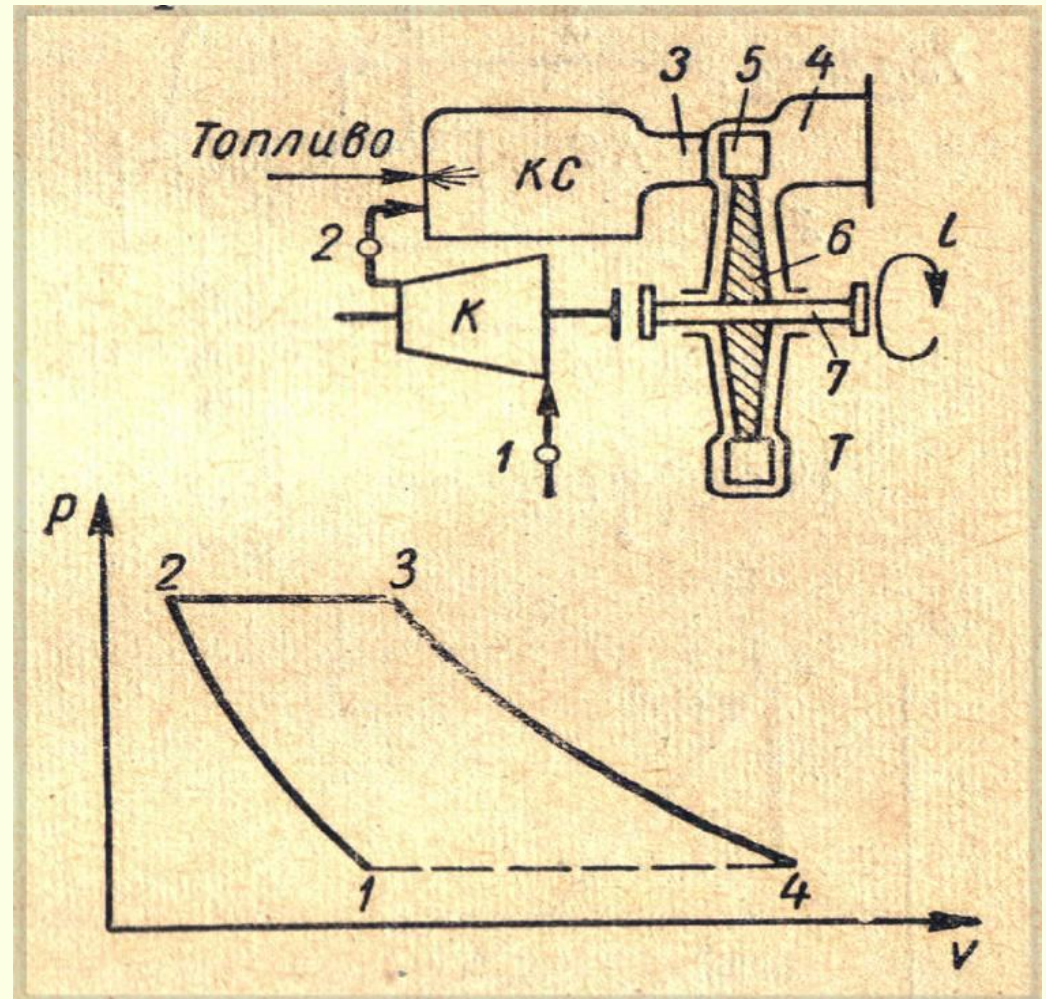


Рис. 1. Схема газотурбинной установки (ГТУ) со сгоранием при $p=\text{const}$ и её рабочий цикл
КС – камера сгорания, Т - турбина

Газотурбинная установка, работающая по циклу со сгоранием топлива при постоянном объеме.

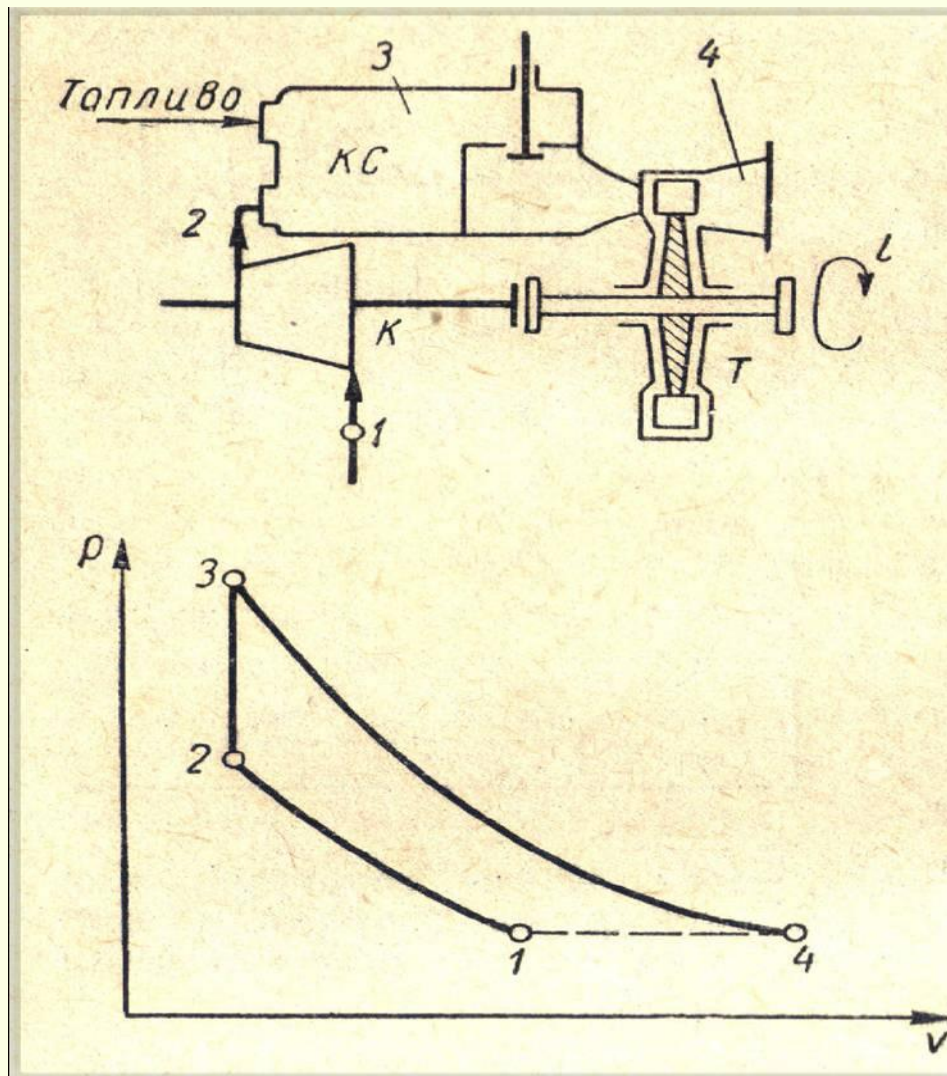


Рис. 2. Схема газотурбинной установки со сгоранием при $v = \text{const}$ и её цикл
К – компрессор, КС – камера сгорания, Т - турбина

Газотурбинная установка, работающая по замкнутой схеме.

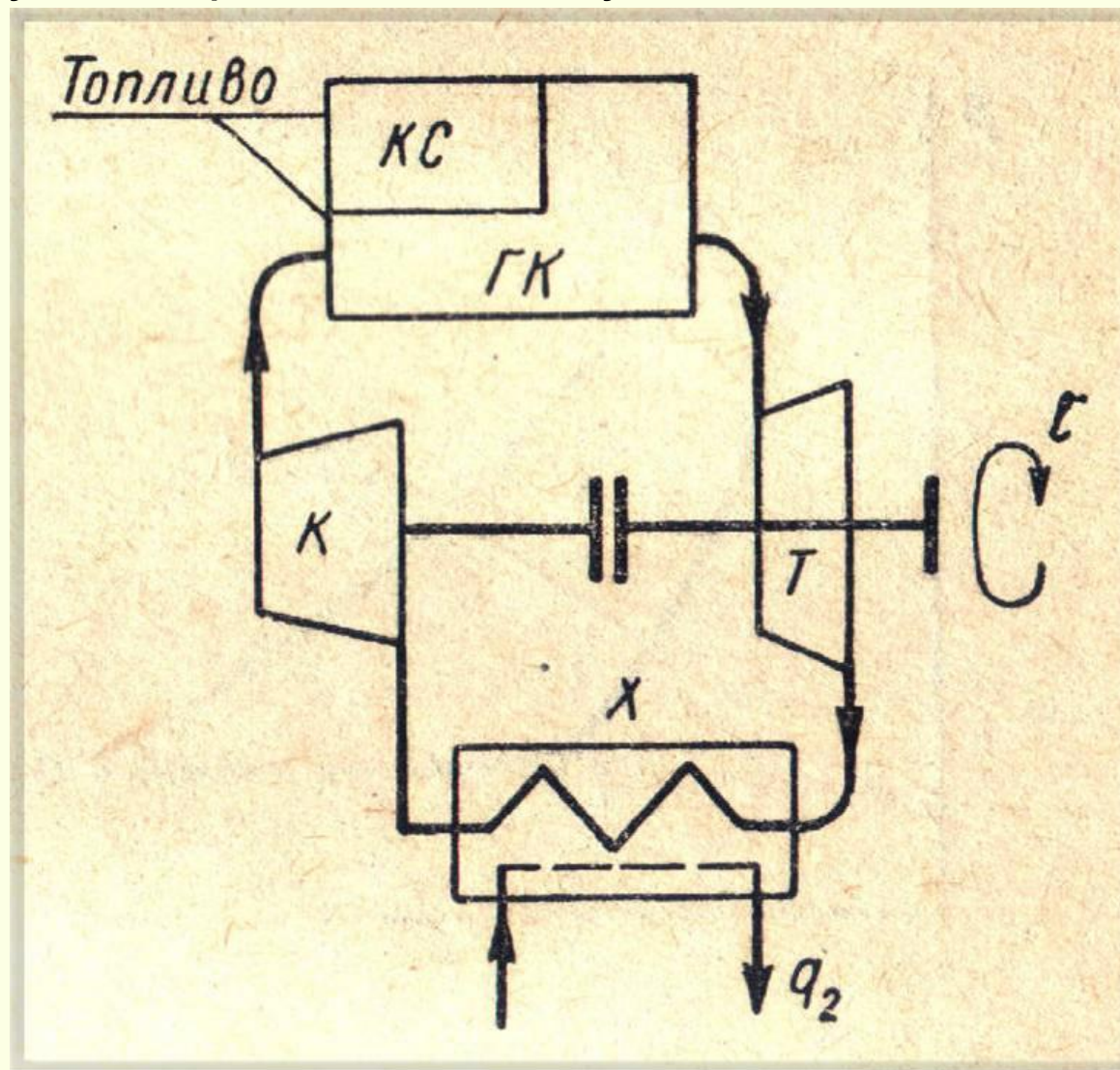


Рис. 3. Схема газотурбинной установки, работающей по замкнутому циклу
К – компрессор, КС – камера сгорания, ГК – газовый котел
Х – холодильник, Т – турбина

Идеальные циклы газотурбинной установки

Цикл с подводом теплоты при $p = \text{const}$.

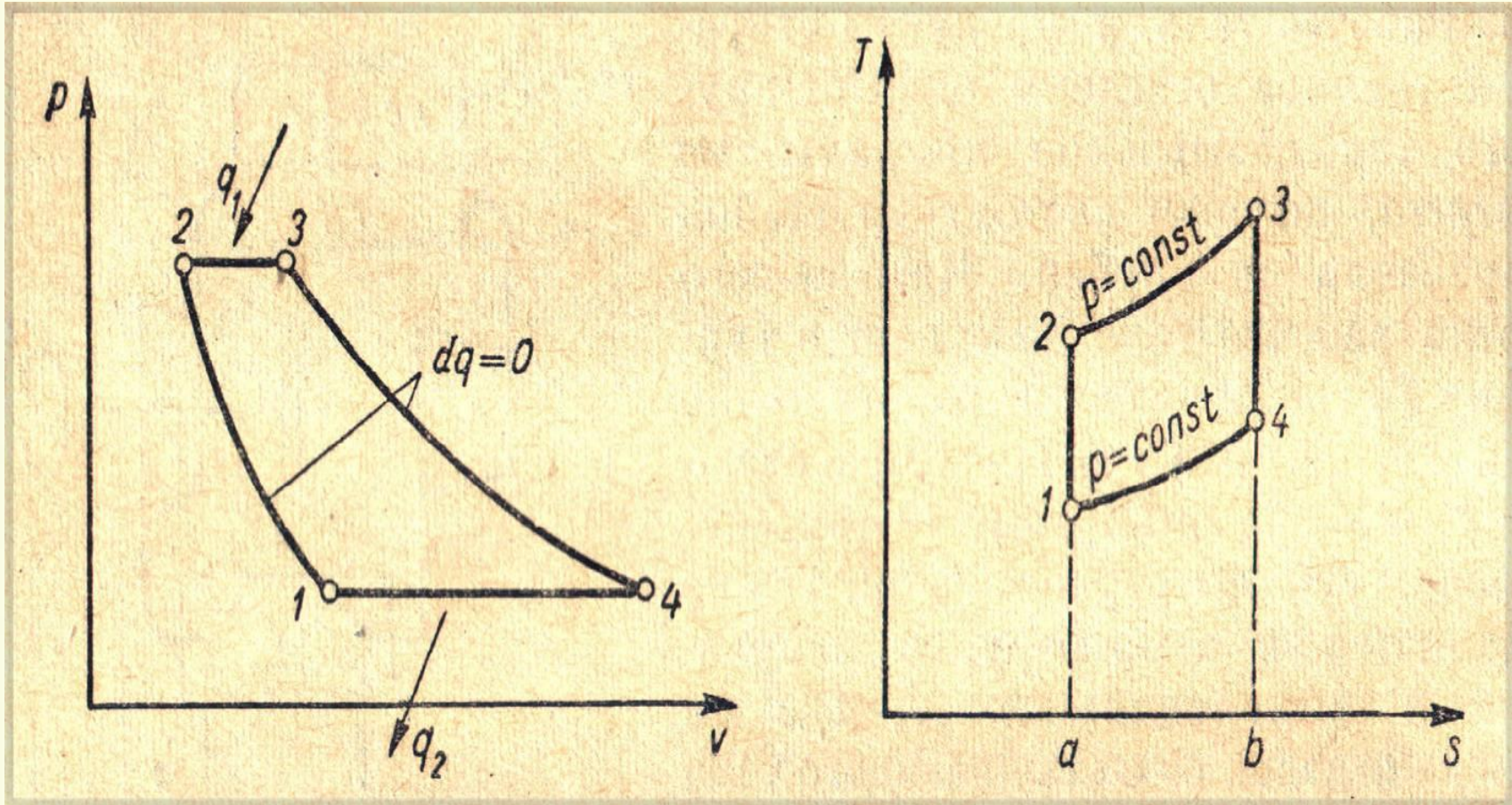


Рис. 4. Идеальный цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при $p = \text{const}$

Рис. 5. Изображение цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при $p = \text{const}$

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) \quad (1)$$

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1) \quad (2)$$

$$l = q_1 - q_2 = c_p (T_3 - T_2) - c_p (T_4 - T_1)$$

$$l = c_p [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (3)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (4)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Степень повышения давления $\frac{p_2}{p_1} = \beta$ (5)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}} \quad (6)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (7)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (8)$$

Степень сжатия $\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (9)$$

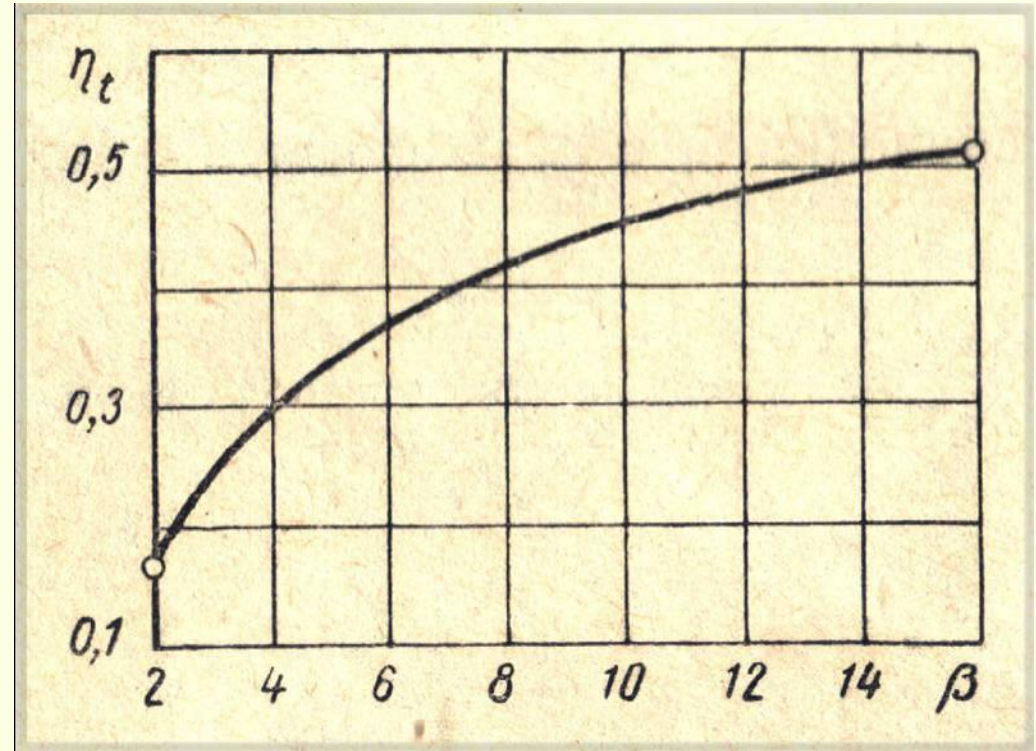


Рис. 6. Зависимость к.п.д. цикла с подводом теплоты при $p = \text{const}$ от степени повышения давления β

Цикл с подводом теплоты при $U = \text{const}$.

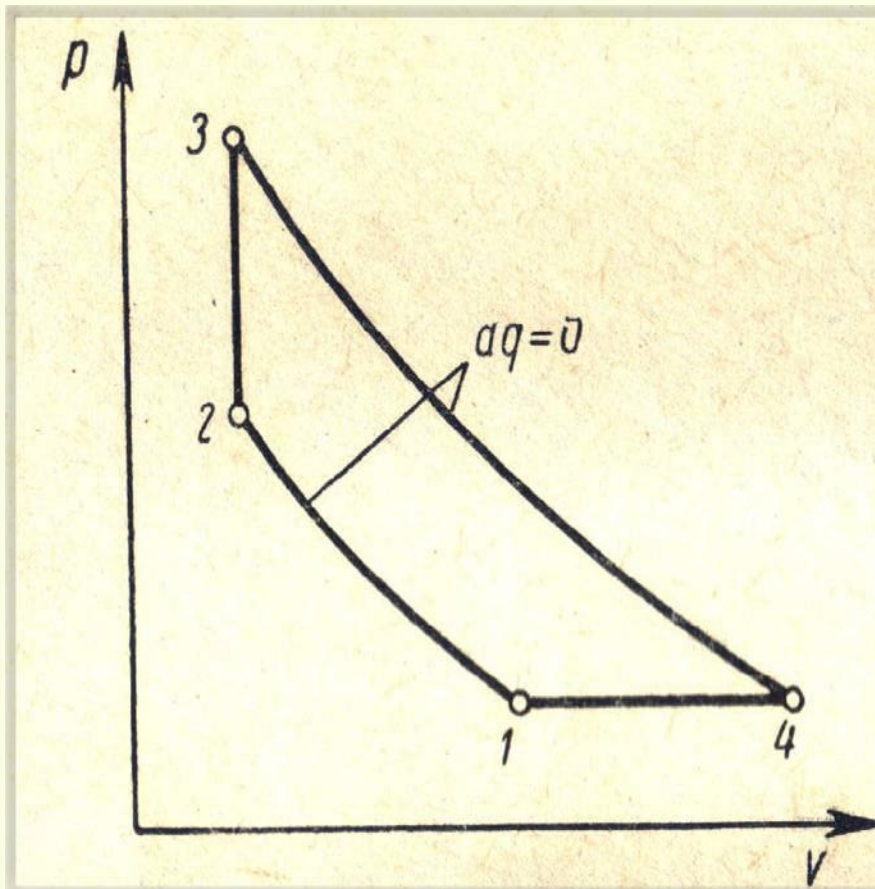


Рис. 7. Идеальный цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объёме

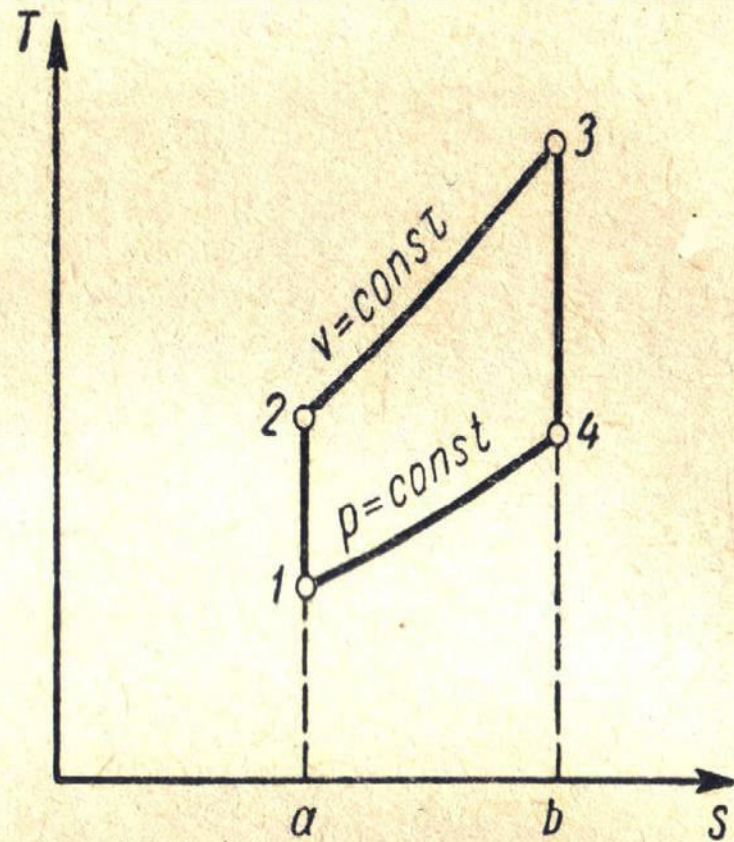


Рис. 8. Изображение цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объёме

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2)$$

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1)$$

$$l = q_1 - q_2 = c_v (T_3 - T_2) - c_p (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_v (T_3 - T_2)}$$

$$\frac{c_p}{c_v} = k$$

$$\eta_t = 1 - k \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right) = 1 - k \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Степень повышения температуры

$$\frac{T_3}{T_2} = \tau$$

(10)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

(11)

$$T_3 = T_2 \tau = T_1 \varepsilon^{k-1} \tau$$

(12)

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \varepsilon^{k-1} \tau \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \frac{1}{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\frac{p_2}{p_4} = \frac{p_2}{p_1} = \beta \quad \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \tau$$

$$T_4 = T_1 \varepsilon^{k-1} \tau \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \frac{1}{\tau^{\frac{k-1}{k}}} \quad (13)$$

$$\varepsilon^{k-1} = \beta^{\frac{k-1}{k}} \quad (14)$$

$$T_4 = T_1 \tau^{\frac{1}{k}} \quad (15)$$

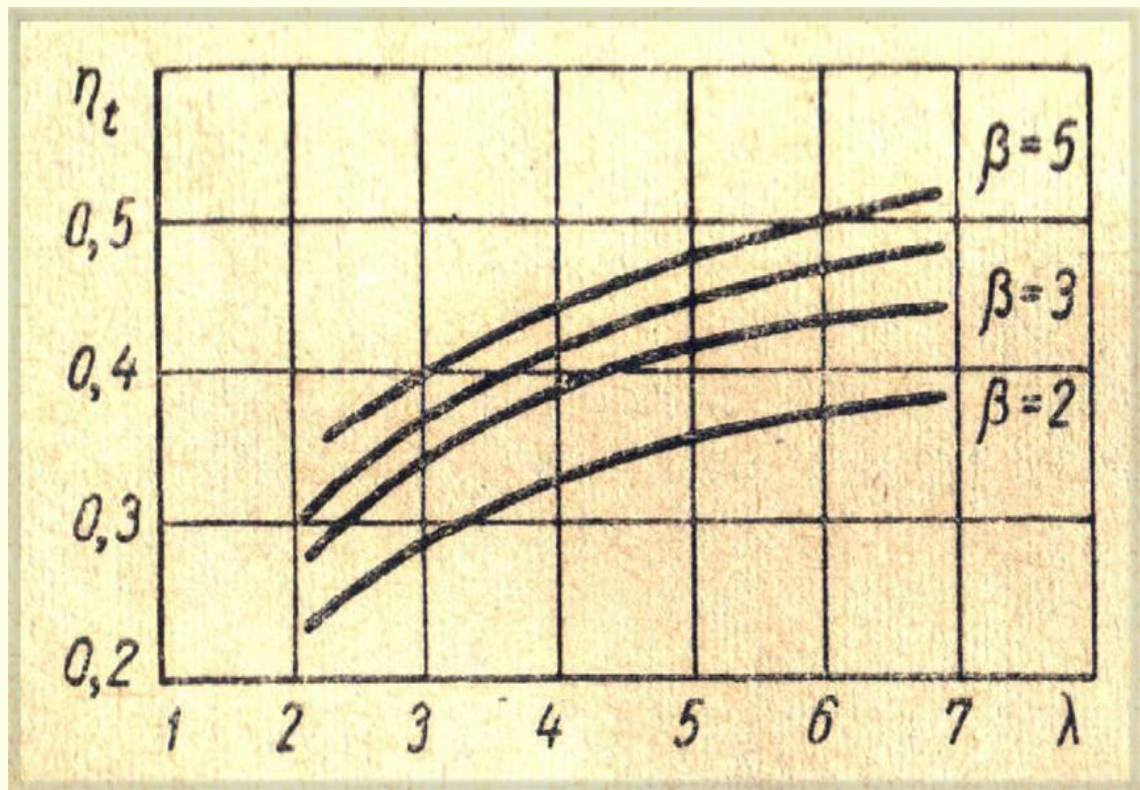
$$\eta_t = 1 - k \frac{T_1 \left(\frac{T_1 \tau^{\frac{1}{k}}}{T_1} - 1 \right)}{T_1 \varepsilon^{k-1} \left(\frac{T_1 \varepsilon^{k-1} \tau^{\frac{1}{k}}}{T_1 \varepsilon^{k-1}} - 1 \right)}$$

$$\eta_t = 1 - k \frac{\tau^{\frac{1}{k}} - 1}{\varepsilon^{k-1} (\tau - 1)} \quad (16)$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}$$

Степень дополнительного повышения давления — отношение давления в конце подвода теплоты при $\nu = \text{const}$ к давлению в конце сжатия:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$



$$\eta_t = 1 - k \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\beta^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)} \quad (17)$$

Рис. 9. Зависимость к.п.д. цикла от степени повышения давления и λ

Пути повышения экономичности идеальных циклов газотурбинных установок

1) Увеличение степени сжатия или степени повышения давления.

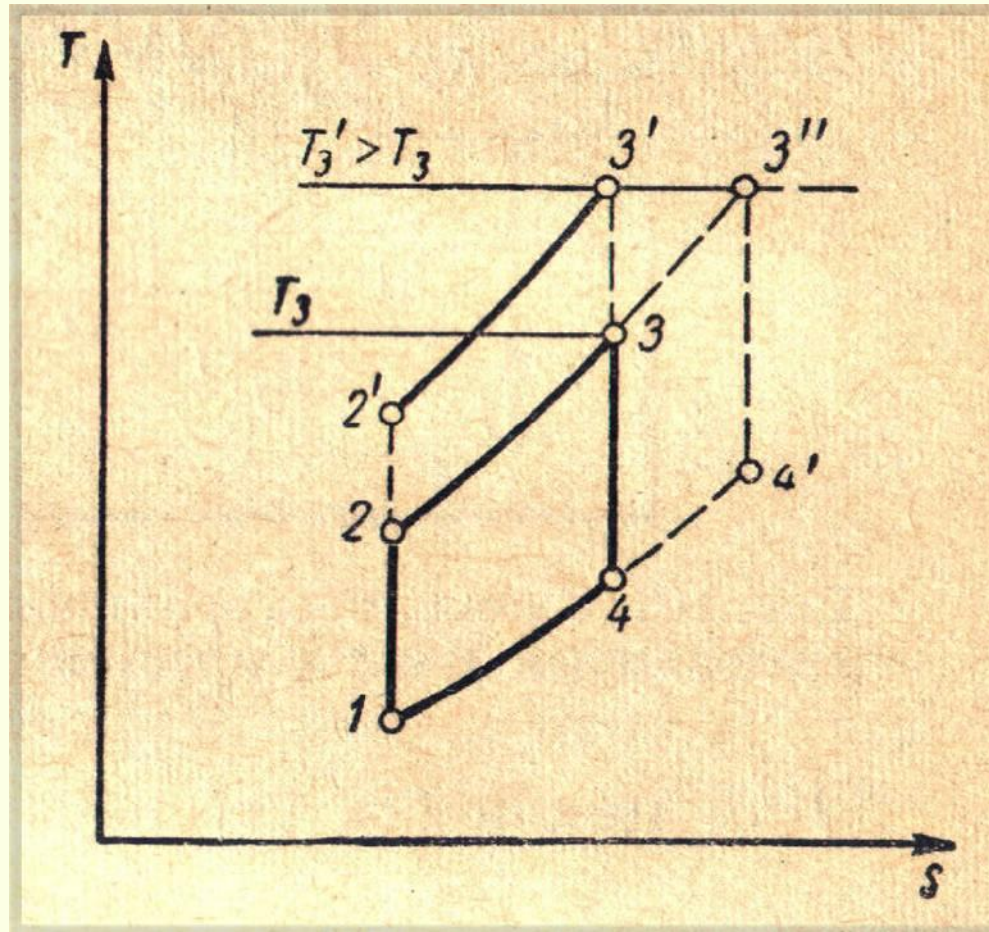


Рис. 10. Изменение цикла газотурбиной установки с подводом теплоты при постоянном давлении и изменении степени сжатия

2) Осуществление в цикле регенерации.

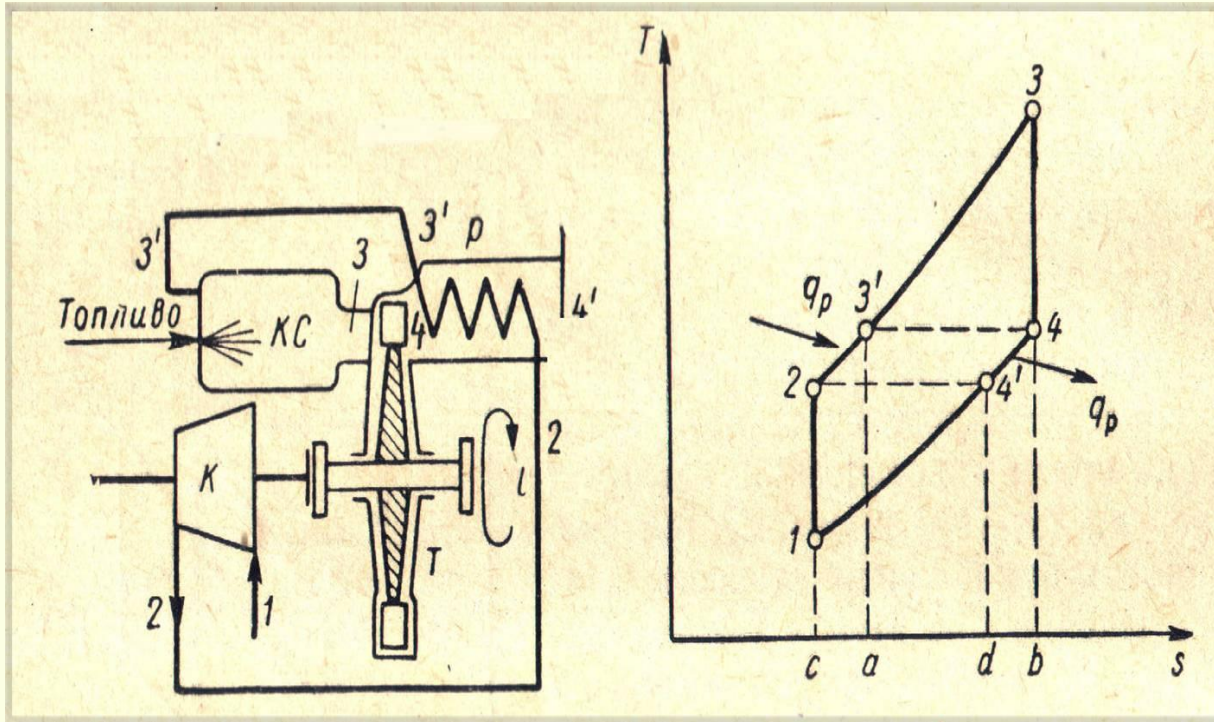


Рис. 11. Схема газотурбинной установки с концевым регенератором и идеальный цикл с простейшей регенерацией

К – компрессор, КС – камера сгорания, Т – турбина

Для цикла без регенерации

$$q_1 = \text{пл. } c23b$$

$$q_2 = \text{пл. } b41c$$

Для цикла с регенерацией

$$q_1 = \text{пл. } a3'3b$$

$$q_2 = \text{пл. } d4'1c$$

3) Применение в цикле ступенчатого подвода теплоты

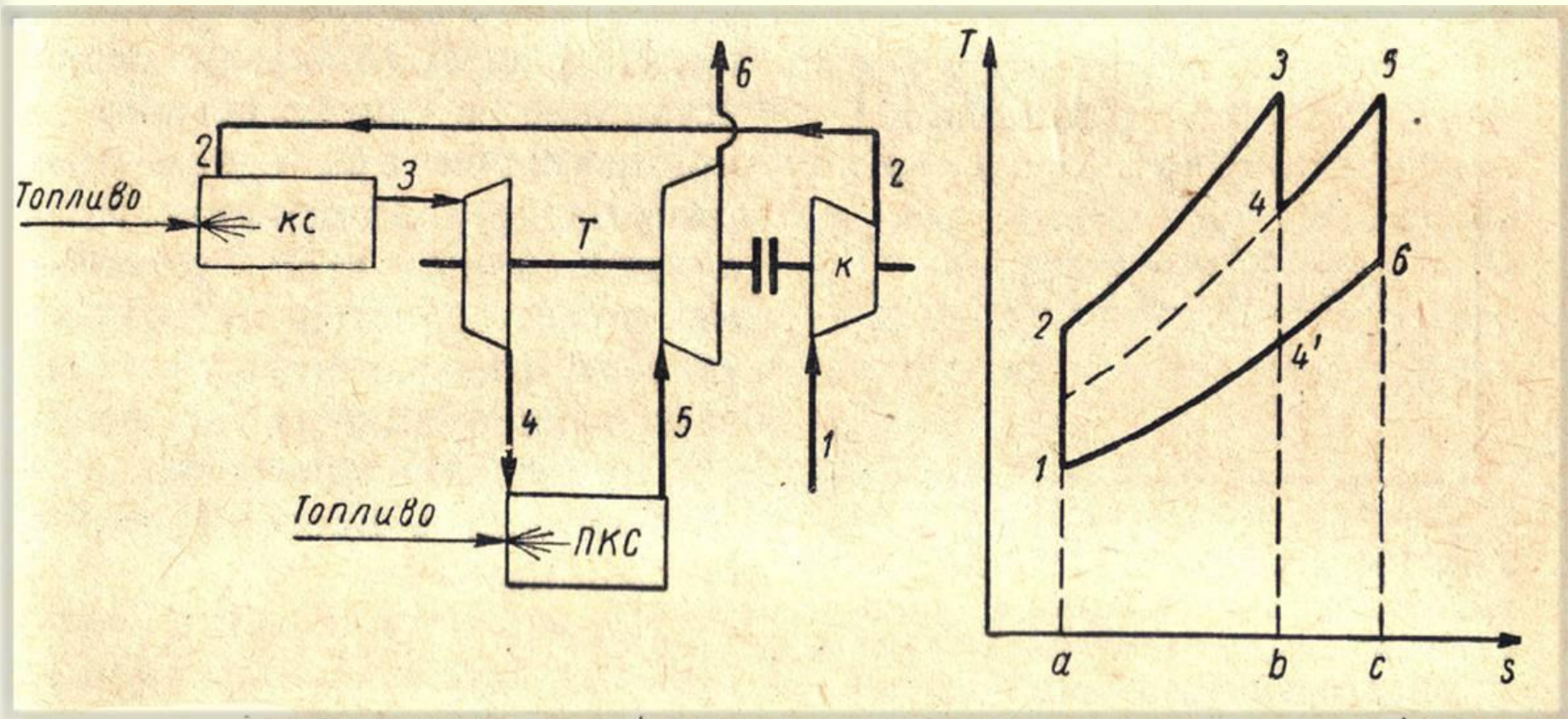


Рис. 12. Схема газотурбинной установки с промежуточной камерой сгорания и её идеальный цикл. К – компрессор, КС – камера сгорания, Т – турбина, ПКС – промежуточная камера сгорания

4) Применение ступенчатого сжатия рабочего тела с промежуточным охлаждением.

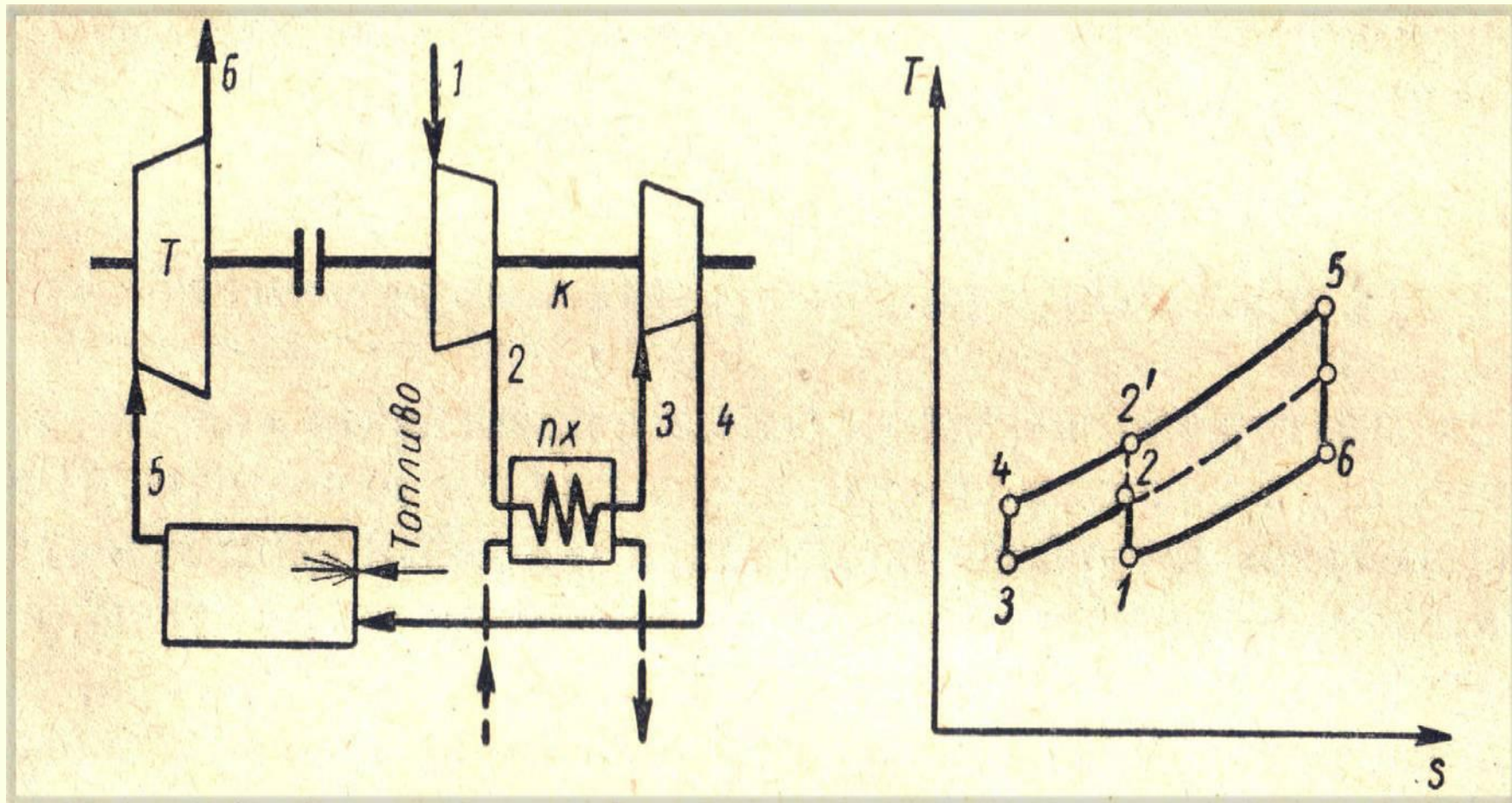


Рис. 13. Схема газотурбинной установки, имеющей компрессор с промежуточным холодильником и её идеальный цикл

К – компрессор, ПХ – промежуточный холодильник, Т – турбина

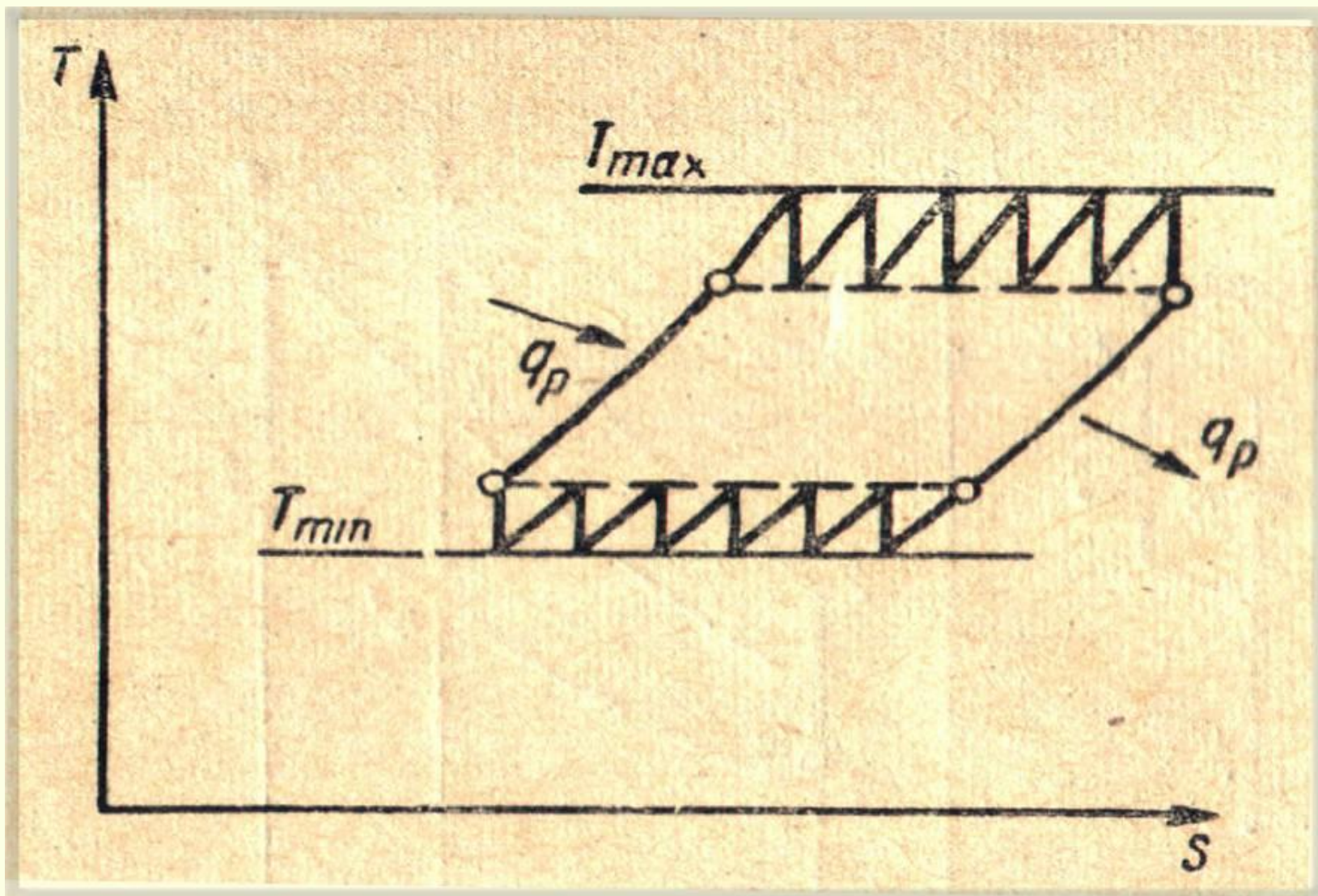


Рис. 14. Предельный случай цикла газотурбинной установки с применением многоступенчатого сжатия и камер промежуточного сгорания

Циклы воздушно-реактивных двигателей

На основании законов механики известно, что при истечении газов из сопла появляется **реактивная сила R** , действующая на сопло в направлении, обратном движению газовой струи. Эта сила создает тягу, вызывающую движение сопла и тех устройств, с которыми оно скреплено. В этом и состоит принцип работы реактивных двигателей.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

Формула
КПД при
 $P = \text{const}$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}$$

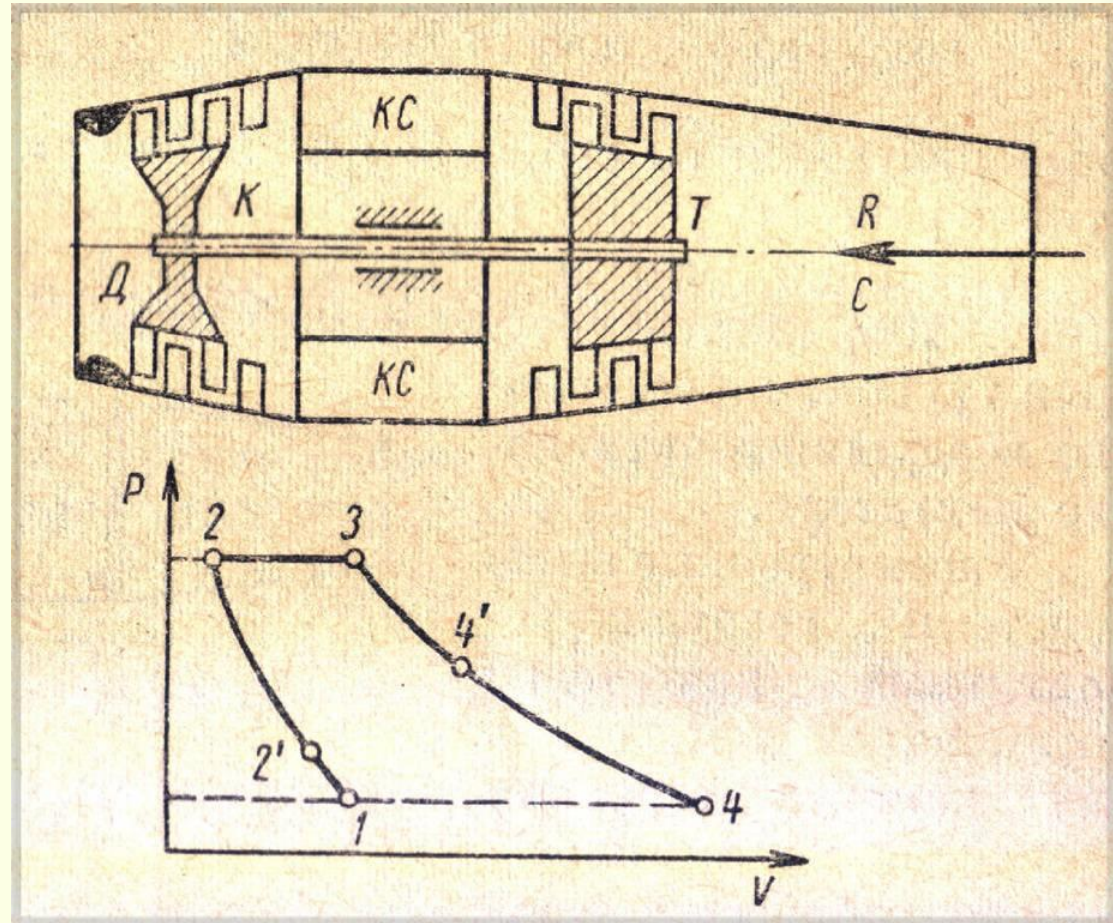


Рис. 15. Схема устройства турбокомпрессорного воздушно-реактивного двигателя и его рабочий цикл. К – компрессор, КС – камера сгорания, Д – диффузор, Т – турбина, С – сопло, R – реактивная сила

При рассмотрении схемы работы воздушно-реактивного двигателя было сказано, что сжатие воздуха по адиабате 1—2 (рис. 15) происходит как в диффузоре, так и в компрессоре. Однако можно представить себе следующий предельный случай: все сжатие от давления p_1 до p_2 происходит только в диффузоре. Компрессор, а с ним и турбина отсутствуют. В этом случае мы получаем так называемый **прямоточный воздушно - реактивный двигатель**. Схема такого двигателя показана на рис. 16. Эти двигатели также применяют в авиации. Следует иметь в виду, что прямоточные двигатели со сгоранием топлива при $p = \text{const}$ могут эффективно работать только при весьма больших скоростях их движения.

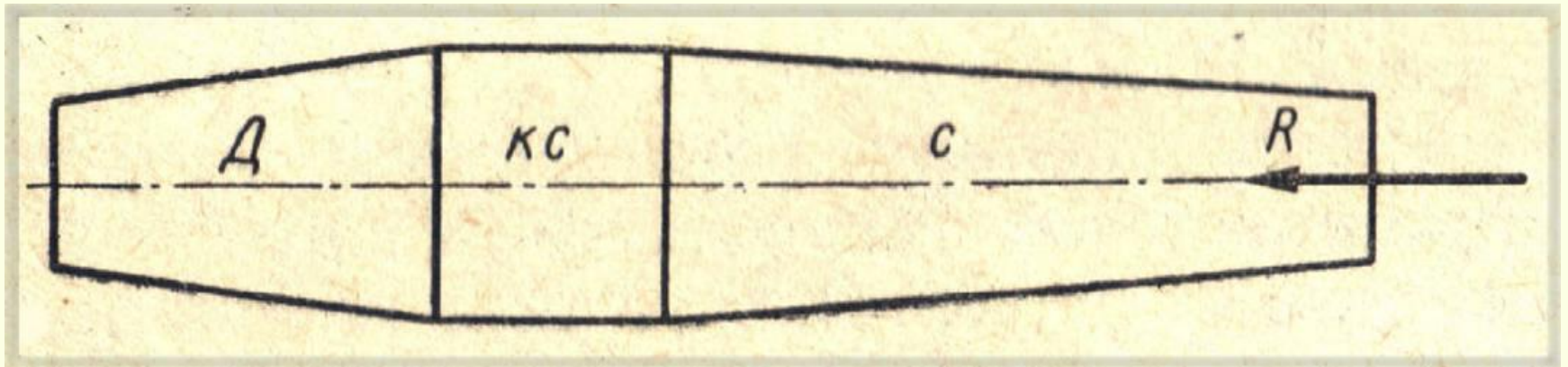


Рис. 16. Схема устройства воздушно-реактивного двигателя
КС – камера сгорания, Д – диффузор

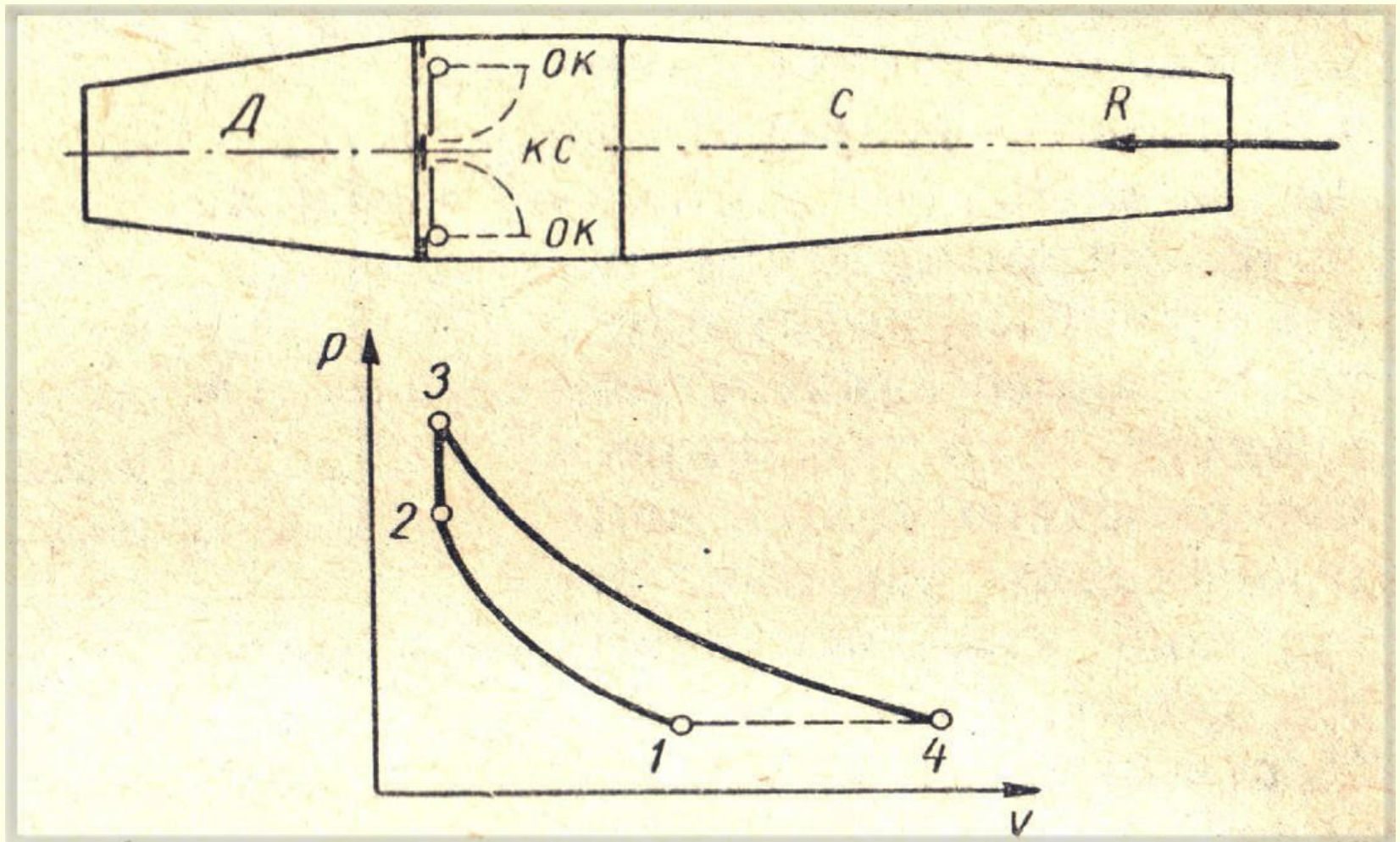


Рис. 17. Схема воздушно-реактивного двигателя со сгоранием топлива при постоянном объеме *КС* – камера сгорания, *Д* – диффузор, *С* – сопло, *Р* – реактивная сила

Особенностью рассматриваемой системы воздушно-реактивного двигателя является прерывистость его рабочего процесса. На этом основании такой двигатель называют **пульсирующим**.

$$\eta_t = 1 - k \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\beta^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)}$$

Циклы жидкостных реактивных двигателей

Воздушно-реактивные двигатели работают только в воздушной среде, откуда они получают окислитель (кислород воздуха), необходимый для горения топлива. Однако от современной техники требуется создание таких реактивных двигателей, которые могли бы работать в безвоздушном пространстве. Особенно большое значение приобретают эти требования в настоящее время, в эпоху космических полетов. Таким требованиям могут отвечать только двигатели, получающие топливо и окислитель из специальных хранилищ, являющихся неотъемлемой частью тех систем, которые они обслуживают (например, летательные аппараты).

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_b}$$

$h_1 - h_2$ - работа за цикл, $h_1 - h_b$ - теплота, подводимая к рабочему телу в идеальном цикле

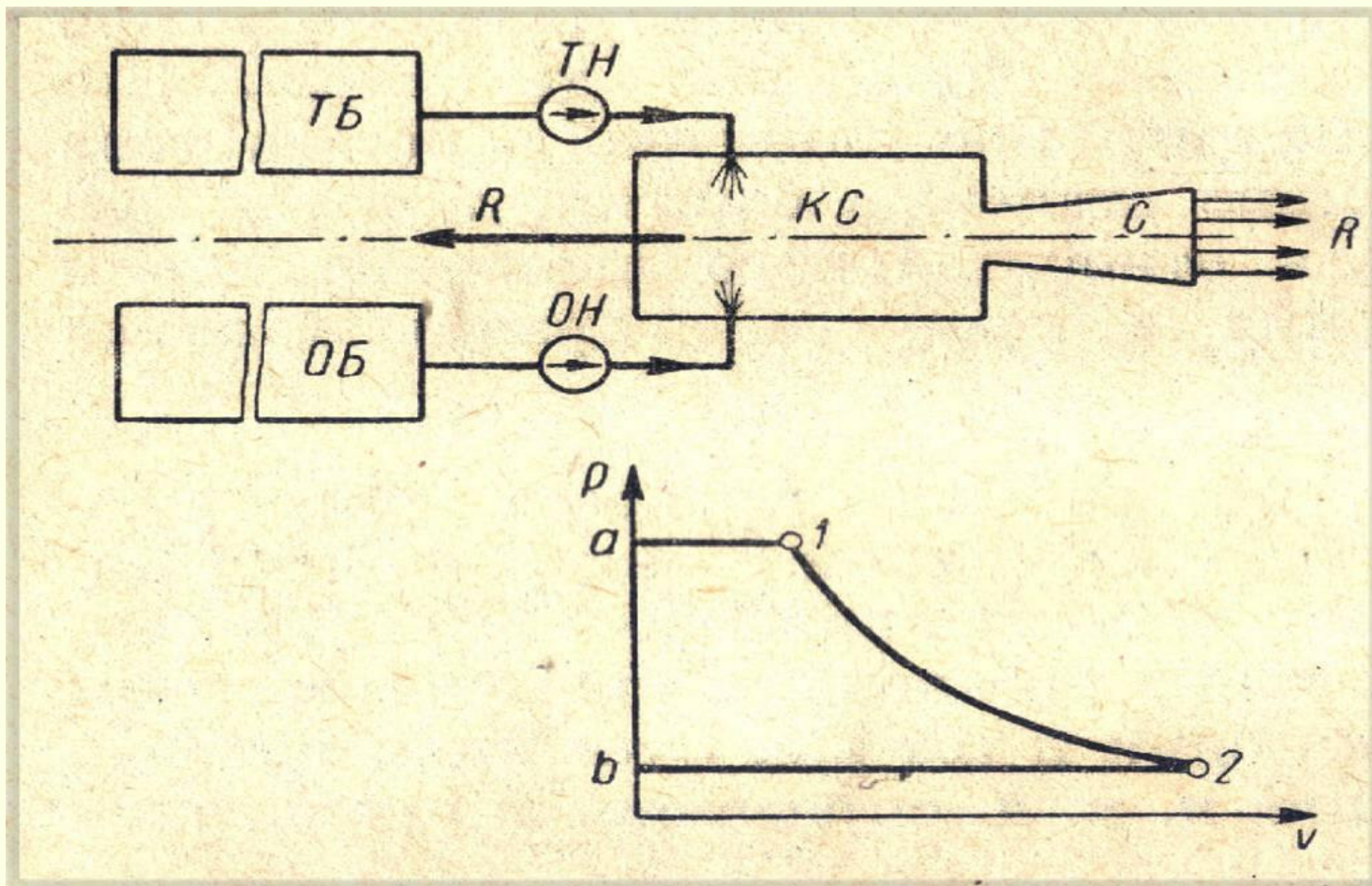


Рис. 18. Схема жидкостного реактивного двигателя и его рабочий цикл.
 КС – камера сгорания, ТБ – топливный бак, ОБ – бак окислителя, ТН – топливный насос,
 ОН – насос окислителя, С – сопло, R – реактивная сила

Контрольные вопросы

- Схема рабочего процесса газовой турбины. Газотурбинная установка
- Схема газотурбинной установки, работающей по замкнутому циклу
- Идеальные циклы газотурбинной установки
- Степень дополнительного повышения давления
- Пути повышения экономичности идеальных циклов газотурбинных установок
- Циклы воздушно-реактивных двигателей
- Циклы жидкостных реактивных двигателей