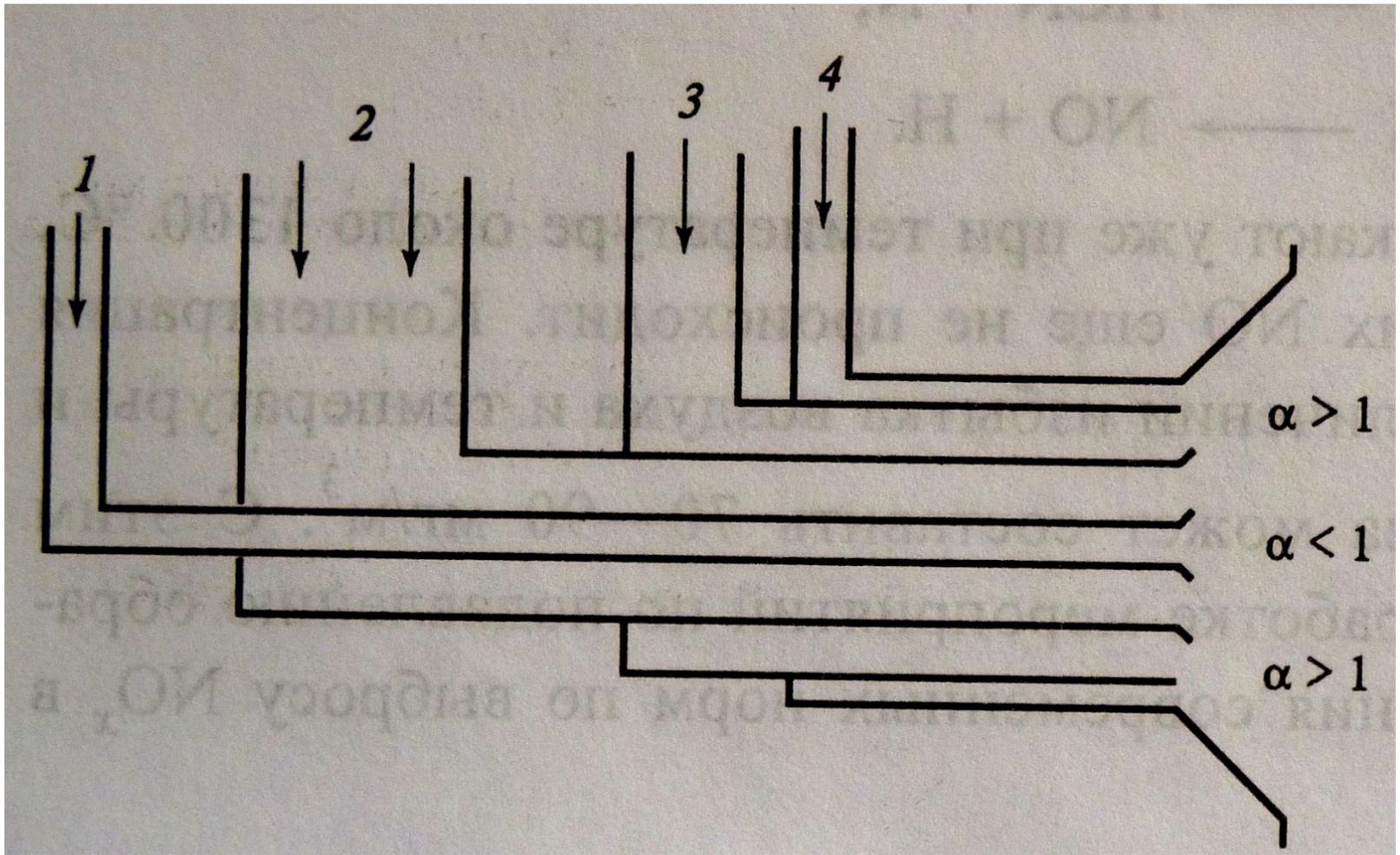


# **ЛЕКЦИЯ 13**

**Для снижения выбросов оксидов азота на ТЭС проводят следующие первичные мероприятия:**

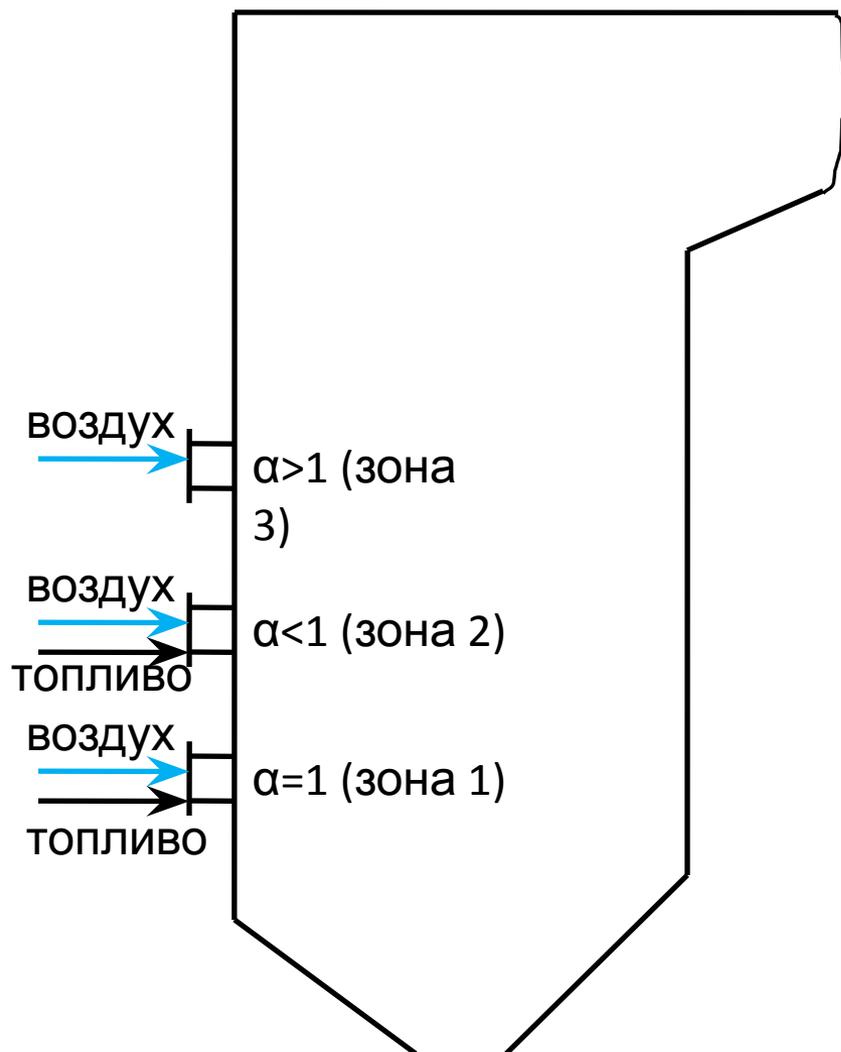
- 1) использование горелок со ступенчатой подачей воздуха (снижение  $\text{NO}_x$  на 60 %);**
- 2) ступенчатое сжигание топлива (снижение  $\text{NO}_x$  на 35–45 %);**
- 3) рециркуляция дымовых газов (снижение  $\text{NO}_x$  на 33 %);**
- 4) впрыск воды (или водомазутной эмульсии) в ядро факела (снижение  $\text{NO}_x$  на 25–44 %).**

**У горелок с низким выбросом  $\text{NO}_x$  организована ступенчатая подача воздуха. Принцип работы такой горелки заключается в следующем. В ядро факела подается количество воздуха, недостаточное для обеспечения полноты горения (кислородный «голод»), в то время как во внешнюю зону горения подается избыточное количество воздуха, чтобы обеспечить полноту сгорания топлива.**



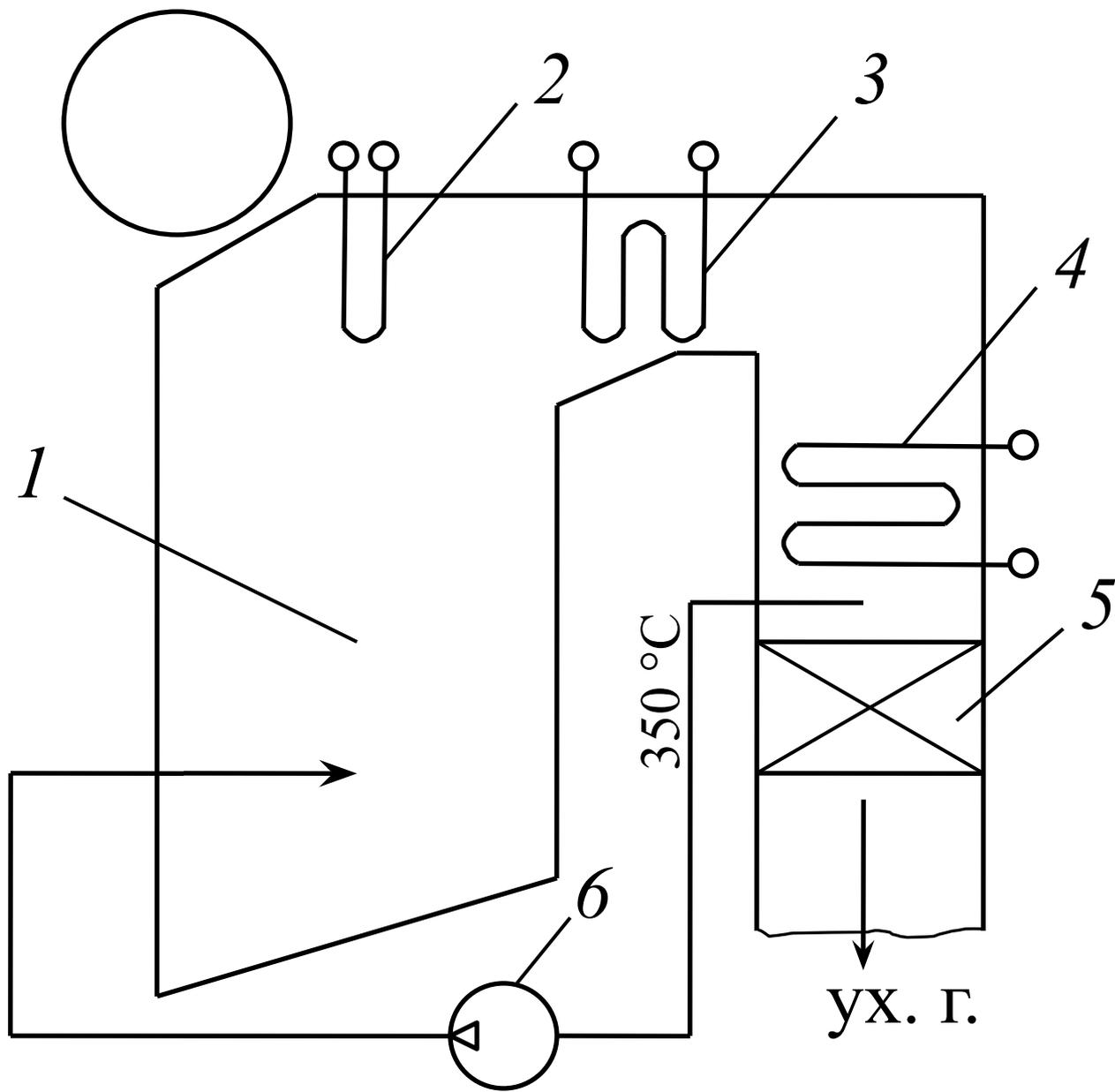
**1 – первичный воздух; 2 – топливно-воздушная смесь; 3 – вторичный воздух; 4 – третичный воздух**

**При ступенчатом сжигании топлива горелки в топке котла размещают в несколько ярусов (обычно 3–4 яруса). Подача воздуха (избыток воздуха) изменяется также поярусно.**



**Зона 1 – горение  
в ядре факела (70–85  
% топлива);**  
**зона 2 – горение  
топлива  
и восстановление  
 $\text{NO}_x$  (15–30 %  
топлива); зона 3 –  
дожигание  
продуктов  
неполного сгорания  
топлива.**

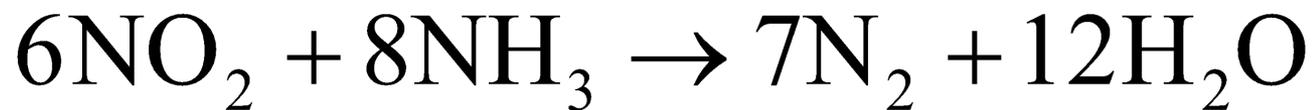
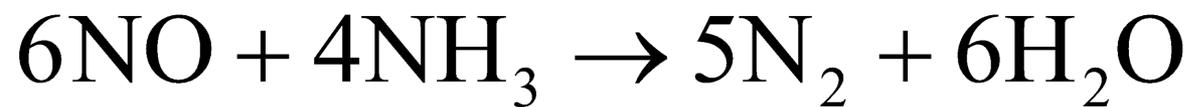
**Рециркуляция дымовых газов из конвективной шахты в топку котла осуществляется с помощью дополнительного дымососа рециркуляции газов. В результате снижается концентрация кислорода и температура в зоне горения.**



**Впрыск воды или ввод водомазутной эмульсии в ядро факела снижает максимальную температуру в нем и тем самым препятствует образованию термических оксидов азота. Количество впрыскиваемой в топку котла воды составляет около 10 % расхода топлива. Этот способ снижает КПД котла приблизительно на 0,7 %. Широкого применения не получил.**

### **3. Вторичные мероприятия по уменьшению выбросов NO<sub>x</sub> :**

**Для очистки дымовых газов от NO<sub>x</sub> используют аммиак NH<sub>3</sub> в качестве восстановителя NO<sub>x</sub> до молекулярного азота. Впрыск аммиака осуществляется через сопло в газоход. Степень очистки дымовых газов может быть доведена до 90 %. Такой системой очистки были оборудованы газомазутные котлы на ТЭЦ-27 в Москве и котлы Тольяттинской ТЭЦ.**



**В 1887 г. инженер-механик  
русского флота П.Д. Кузьминский  
сконструировал и построил первую в  
мире газовую реверсивную турбину.  
Широкое распространение  
газотурбинных установок стало  
возможным после решения двух  
основных проблем: создания газового  
компрессора с высоким КПД и  
получения новых жаропрочных  
сплавов, способных длительно  
работать при температурах 700–800 °С и  
выше.**

**Первая энергетическая ГТУ была создана в 1939 г. Фирмой «Браун-Бовери» (Швейцария).**

**В ГТУ температура подвода теплоты (1250 – 1500 °С) значительно выше, чем в ПТУ. Но сложнее решается задача снижения температуры рабочего тела при отводе теплоты из цикла. В ГТУ она достигает 540 – 630 °С, имея тенденцию к увеличению с ростом начальной температуры газов. Лучшие энергетические ГТУ отпускают электроэнергию с КПД нетто, равным 40 – 42 %**

**В ГТУ полезная работа производится за счёт кинетической энергии движущегося газа. Поток газа (продукты сгорания), протекая по криволинейным каналам, образованным насаженными на ротор лопатками, приводит во вращение ротор турбины, а через него ротор электрогенератора.**

## Классификация ГТУ по назначению:

- 1) **энергетические** (для выработки электрической и тепловой энергии);
- 2) **транспортные** (для самолетов, судов);
- 3) **приводные** (для привода центробежных компрессоров, воздуходувок);
- 4) **энерготехнологические** (работают в технологических схемах).

- Классификация ГТУ по маневренности:**
- 1) *стационарные* (работают на постоянного теплового потребителя);**
  - 2) *передвижные* (используются там, где отсутствуют энергосистемы).**

**Широкое применение на ТЭС  
получили ГТУ с разомкнутым  
(открытым) циклом,  
в которых сжигается  
высококачественное органическое  
топливо – преимущественно природный  
газ, реже жидкое газотурбинное топливо  
или высококачественный мазут.**

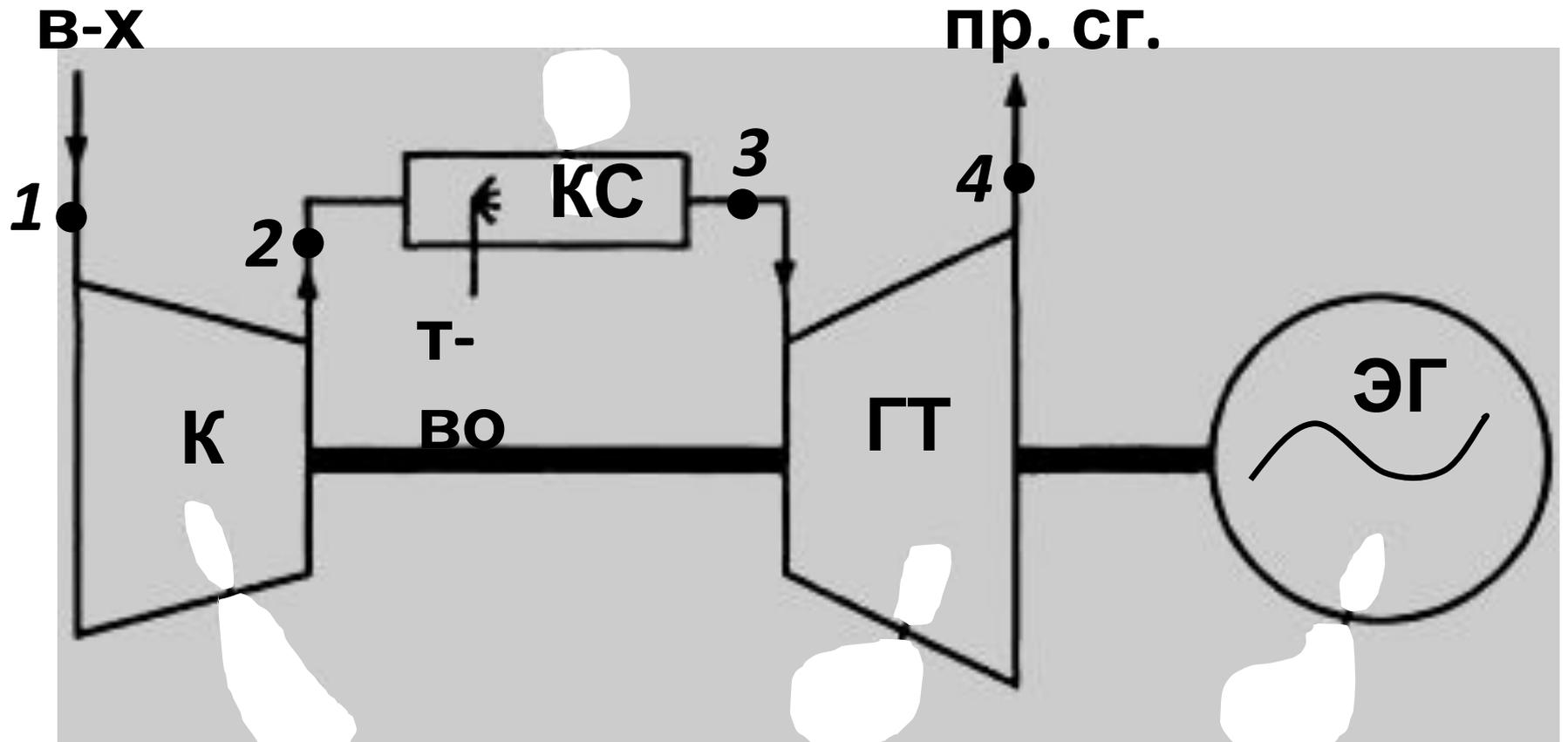
**В России работает ряд газотурбинных  
ТЭС:**

**ГРЭС им. Р.Э. Классона ОАО  
«Мосэнерго», Краснодарская ТЭЦ,  
Якутская ГРЭС и др.**

**Использование ГТУ в качестве энергетических установок обусловлено следующими преимуществами:**

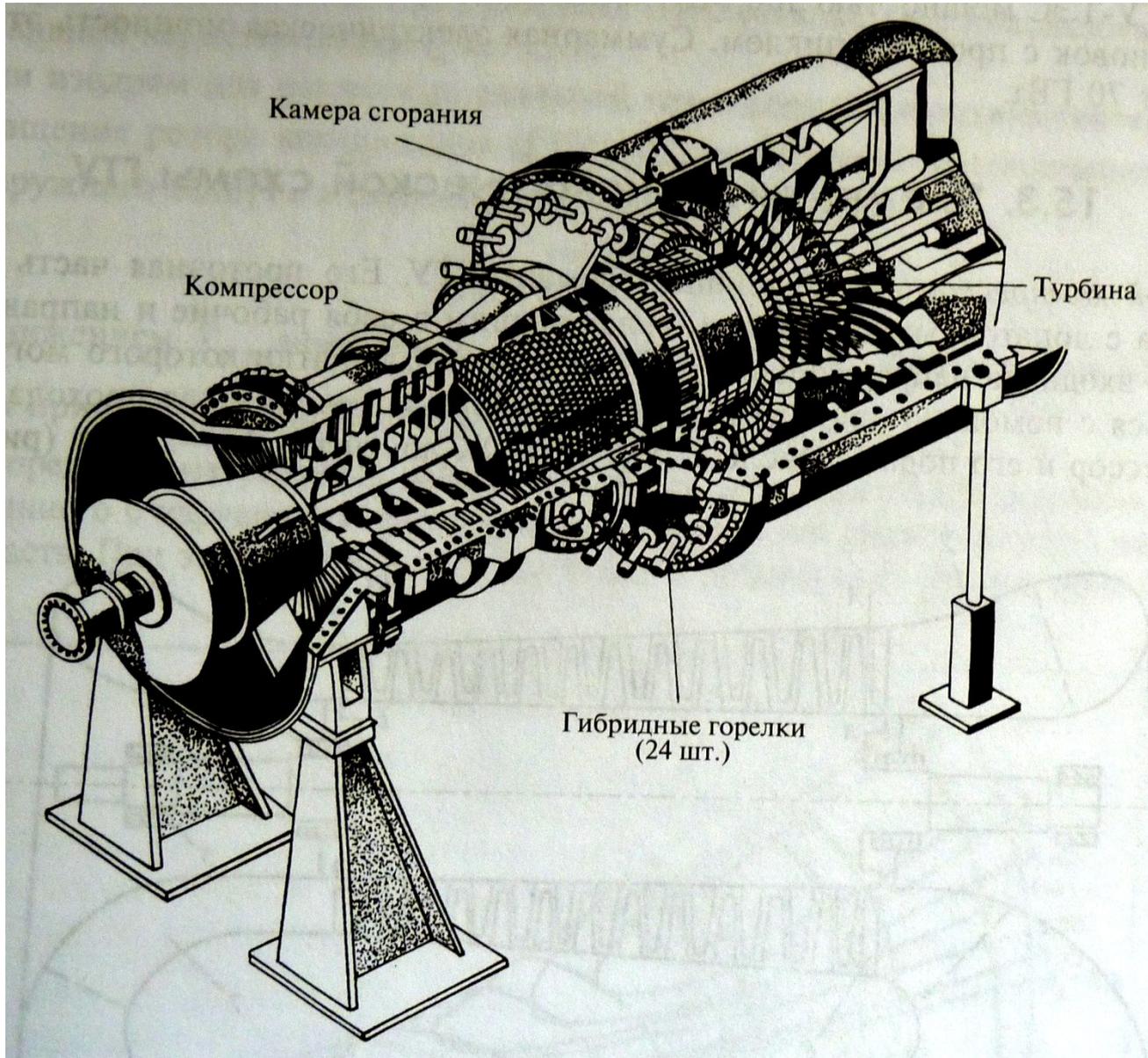
- 1) компактность;**
- 2) низкая удельная стоимость;**
- 3) быстрый пуск и набор нагрузки;**
- 4) возможность ввода в эксплуатацию в течение короткого срока;**
- 5) минимальное потребление технической воды.**

# Принципиальная схема ГТУ



**К** – осевой компрессор; **КС** – камера сгорания;  
**ГТ** – газовая турбина; **ЭГ** – электрогенератор

# Общий вид энергетической ГТУ типа V94.3А фирмы «Сименс»



**При термодинамическом анализе цикла ГТУ делаются следующие упрощающие допущения:**

- 1) рабочее тело (продукты сгорания) обладает свойствами воздуха с постоянными теплофизическими характеристиками. Это допущение оправдано тем, что отношение массового расхода топлива к массовому расходу воздуха составляет 2–5% ( $\alpha = 2,5 - 5,0$ );**

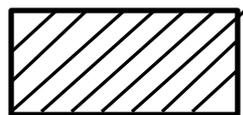
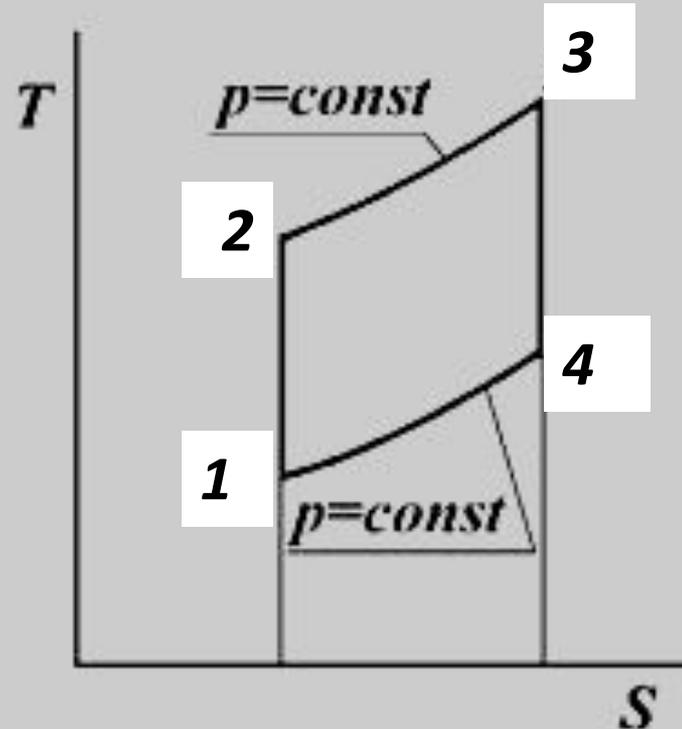
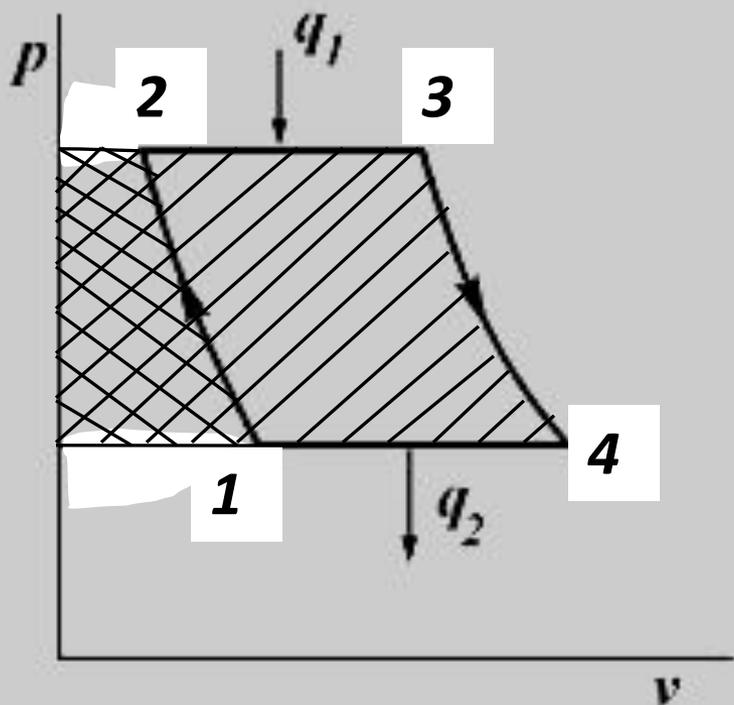
**2) сжатие рабочего тела (воздуха) в компрессоре и его расширение в турбине осуществляются адиабатически. Это объясняется тем, что скорости течения рабочего тела в компрессоре и в турбине велики (сравнимы со скоростью звука) и за время прохождения воздуха через проточные части компрессора и турбины теплообмен с их внутренними поверхностями пренебрежимо мал по сравнению с работой сжатия или расширения;**

**3) процесс сгорания топлива в камере сгорания считается изобарным;**

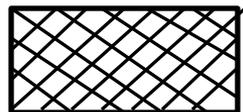
**4) турбины обычно рассчитываются так, чтобы в номинальном режиме продукты сгорания выходили в атмосферу с давлением, близким к атмосферному. Это позволяет считать процесс отвода тепла к нижнему источнику (атмосфере) изобарным.**

**В соответствии с перечисленными допущениями теоретический цикл идеализированной ГТУ будет состоять из двух адиабат сжатия в компрессоре (процесс 1–2) и расширения в турбине (процесс 3–4) и двух изобар подвода теплоты в камере сгорания (процесс 2–3) и отвода теплоты в атмосферу (процесс 4–1).**

# Теоретический цикл ГТУ с подводом теплоты при $p=\text{const}$ (цикл Брайтона)



техническая работа, совершаемая турбиной



работа, затраченная на привод компрессора

**Полезная работа в цикле равна разности между технической работой турбины и работой, затраченной на привод компрессора:**

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{тех}} - l_{\text{к}}.$$

**Эта же полезная работа равна теплоте цикла  $q_{\text{ц}}$ , которая вычисляется как разность между количеством подведенной и отведенной теплоты:**

$$l_{\text{ц}} = q_{\text{ц}} = q_1 - q_2.$$

# Термический КПД термодинамического цикла ГТУ:

$$\eta_t = q_{\text{ц}}/q_1 = 1 - q_2/q_1.$$

Здесь:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2);$$

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

- Обычно при термодинамическом расчёте ГТУ считаются заданными:
- 1) параметры атмосферного воздуха  $p_1$ ,  $T_1$ ;
  - 2) степень повышения давления рабочего тела в компрессоре  $\pi = p_2/p_1$  (для ГТУ  $\pi = 7-8$ );
  - 3) максимальная температура рабочего тела в цикле  $T_3$  или отношение экстремальных температур в цикле  $\xi = T_3/T_1$ ;
  - 4) мощность газотурбинной установки  $N$ .

**В процессе термодинамического расчёта ГТУ вычисляются:**

- 1) параметры рабочего тела в характерных точках цикла (1,2,3,4);**
- 2) удельные количества подведённой в цикле теплоты  $q_1$ , отведённой теплоты  $q_2$ , работы цикла  $l_{\text{ц}}$ ;**
- 3) термический КПД цикла  $\eta_t$ ;**
- 4) массовый расход рабочего тела  $G = N/l_{\text{ц}}$ .**

# Расчёт параметров в характерных точках цикла ГТУ $p=\text{const}$

Параметры	Характерные точки цикла			
	1	2	3	4
$p$	$p_1$	$p_2 = p_1 \pi$	$p_3 = p_2 = p_1 \pi$	$p_4 = p_1$
$T$	$T_1$	$T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}$	$T_3 = T_1 \xi$	$T_4 = \frac{T_3}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = T_1 T_3 / T_2$
$v$	$v_1 = RT_1 / p_1$	$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{v_1}{\pi^{\frac{1}{k}}}$	$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = v_2 T_3 / T_2 = v_1 \xi / \pi$	$v_4 = \frac{v_3}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{v_1 \xi}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$

**Подведенная в цикле теплота:**

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = c_p T_1 \left( \xi - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

**Отведенная в цикле теплота:**

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1) = c_p T_1 \left( \frac{\xi}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right)$$

**Удельная работа цикла:**

$$l_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = c_p T_1 \left( \xi - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) \left( 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right)$$

**Термический КПД цикла:**

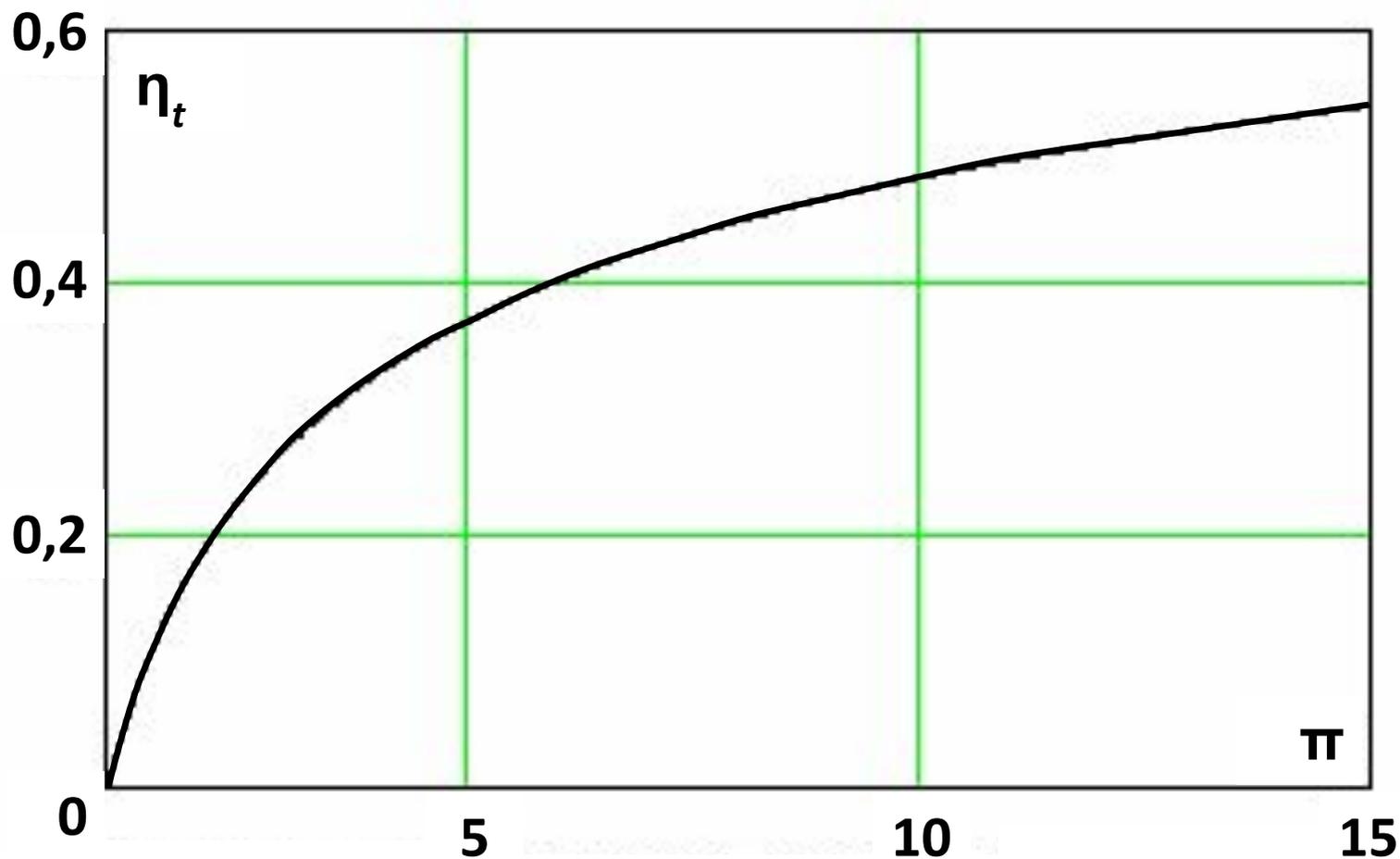
$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

**Здесь  $k = c_p / c_v$  – показатель адиабаты  
(для воздуха  $k = 1,4$ ).**

**Термический КПД цикла ГТУ зависит только от степени повышения давления в компрессоре (растет с увеличением  $\pi$ ) и не зависит от температурного интервала цикла, характеризуемого отношением**

$$\xi = T_3 / T_1.$$

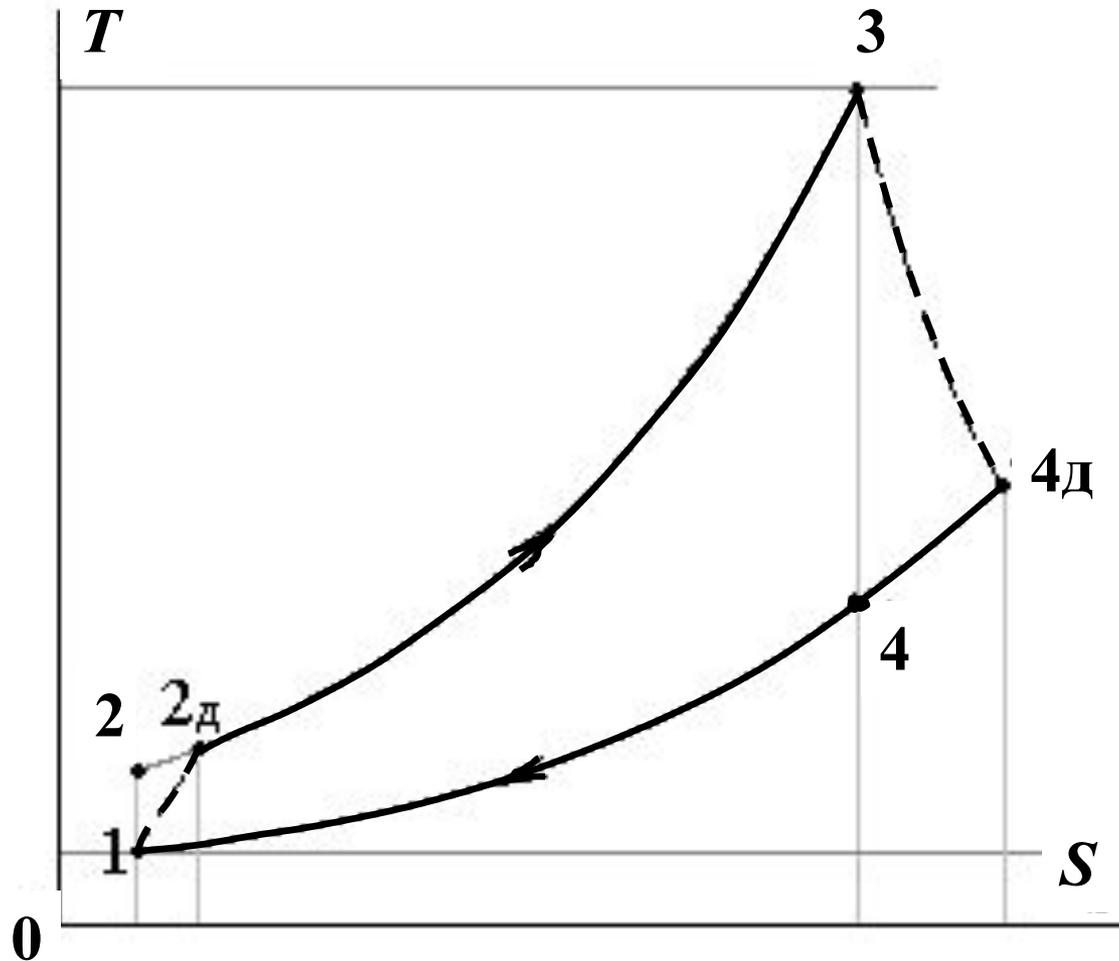
# Зависимость термического КПД цикла ГТУ $p=\text{const}$ от степени повышения давления в компрессоре



**В действительности все происходящие в ГТУ процессы неравновесны и всегда сопровождаются потерями, связанными с выделением тепла трения, что в адиабатических процессах приводит к возрастанию энтропии.**

**Процессы сжатия и расширения идут не по адиабате. На сжатие затрачивается больше энергии, а в турбине совершается меньшая работа.**

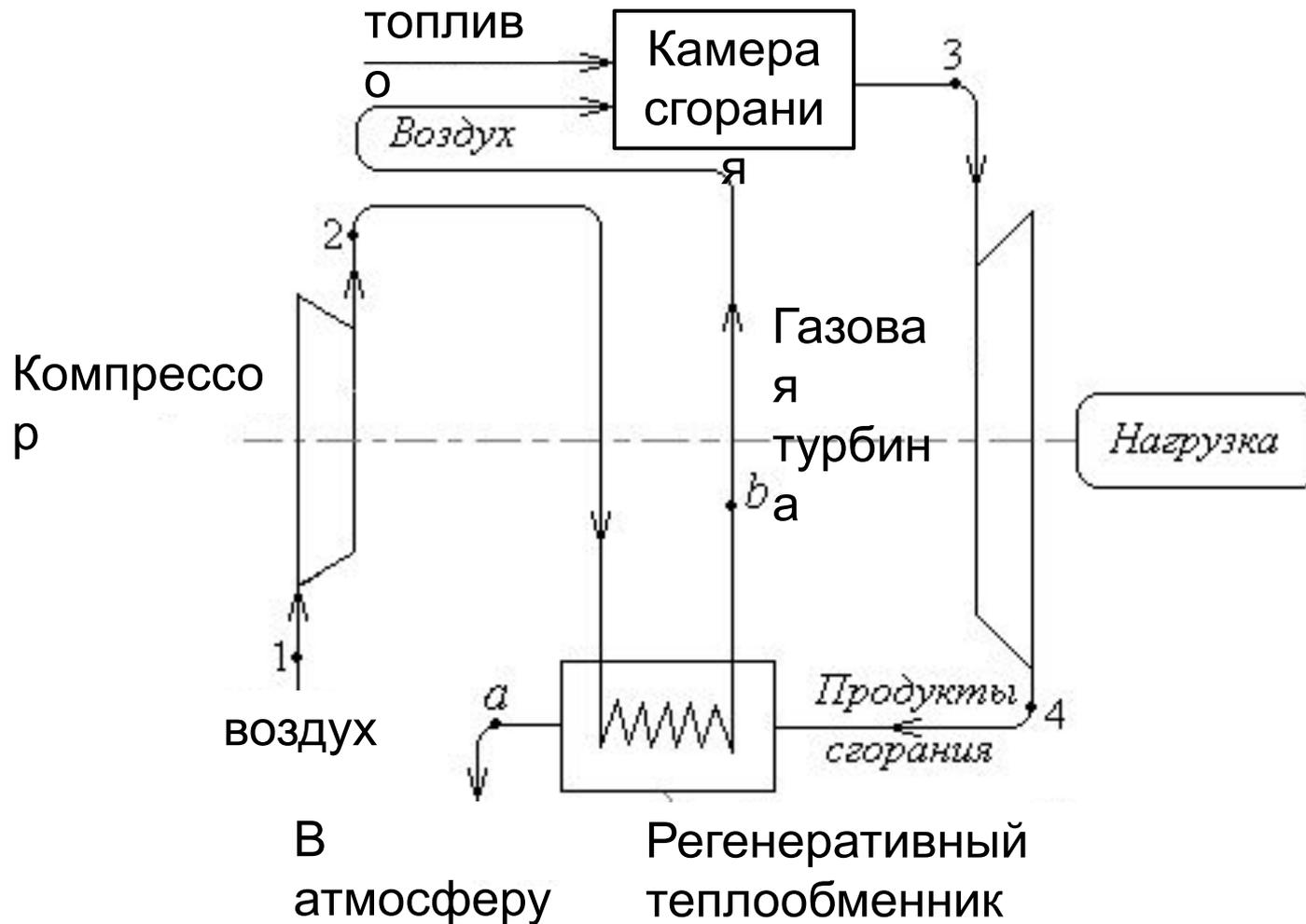
# Цикл ГТУ с учетом необратимости процессов сжатия в компрессоре и расширения в турбине



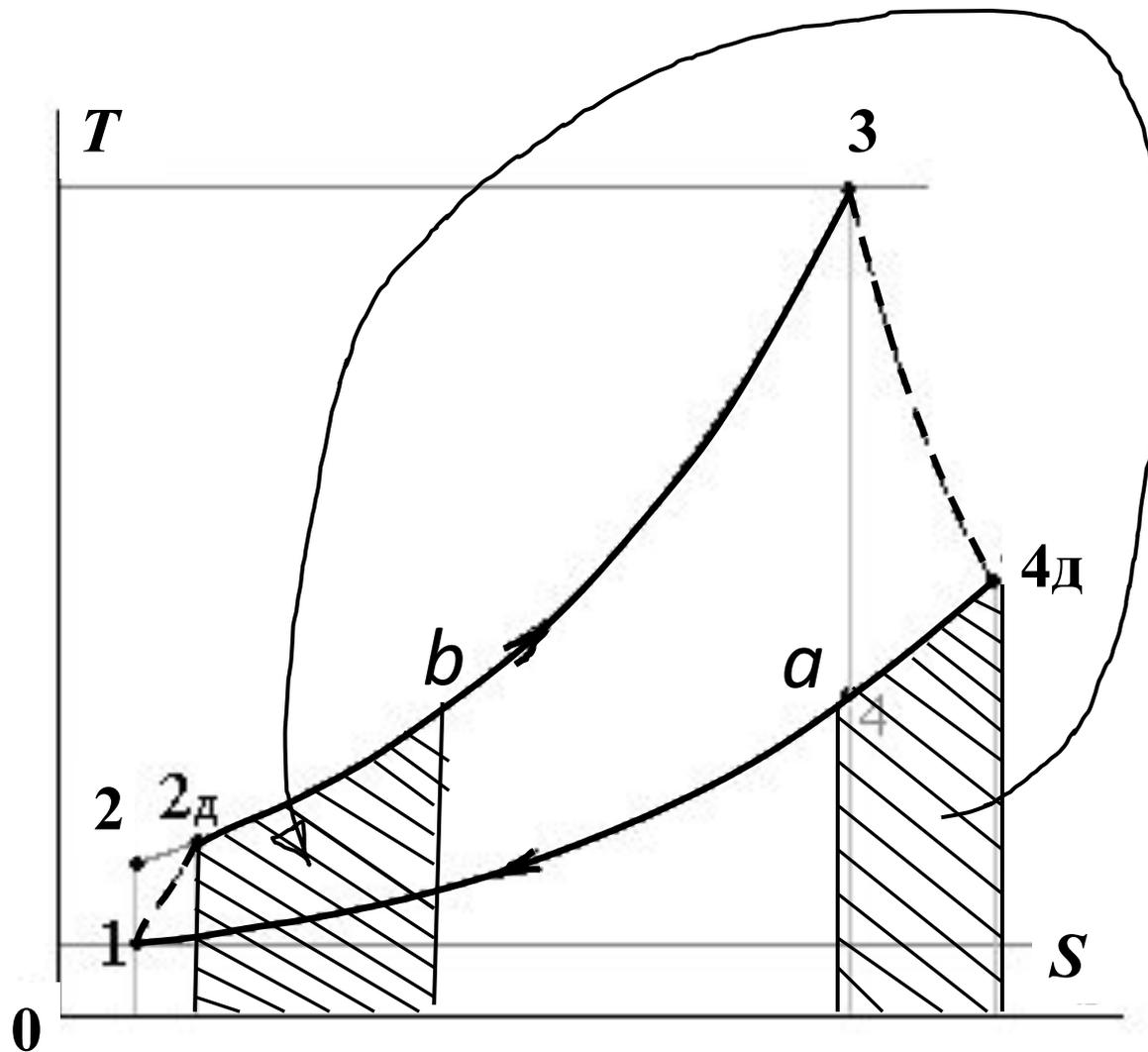
**Цикл ГТУ с регенерацией теплоты**  
**Регенерация теплоты в цикле** — это полезное использование внутри цикла части теплоты, отводимой к нижнему источнику, т. е. часть сбросной теплоты, подводится к рабочему телу.

**Регенерация теплоты в цикле теплового двигателя любой конструкции приводит к повышению его термического КПД.**

# Принципиальная схема ГТУ с регенерацией теплоты



# Цикл ГТУ с регенерацией теплоты



**Регенерация теплоты *не выгодна конструктивно* в транспортных установках (особенно в авиации), так как её введение требует усложнения установки, что неизбежно приведёт к увеличению её веса и к уменьшению надёжности.**

**В стационарных же установках (и в некоторых случаях в наземном и водном транспорте) введение регенерации во многих случаях **возможно и выгодно.****

**Полезная работа в цикле  
с регенерацией теплоты не меняется:**

$$l_{\text{ц}}^{\text{p}} = l_{\text{ц}}$$

**Количество подведенной теплоты  
уменьшается:**

$$q_1^{\text{p}} = q_1 - q_{\text{p}}$$

**Термический КПД цикла с  
регенерацией теплоты возрастает:**

$$\eta_t^{\text{p}} = \frac{l_{\text{ц}}^{\text{p}}}{q_1 - q_{\text{p}}} > \eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1}$$

# Термический КПД цикла с регенерацией теплоты:

$$\eta_t^p = 1 - \frac{q_2^p}{q_1^p} = 1 - \frac{c_p (T_a - T_1)}{c_p (T_3 - T_b)}$$