

План лекции:

1. Циклы газотурбинных установок
2. Цикл газотурбинной установки с регенерацией теплоты
3. Вопросы для дистанционного освоения лекции

1. ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК

Одним из основных недостатков, присущих поршневым двигателям внутреннего сгорания, является **неизбежная неравномерность работы двигателя** во времени - в течение цикла температуры и давления в цилиндре резко меняются; для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное неизбежно применение кривошипно-шатунного механизма. Средняя скорость рабочего тела относительно двигателя невелика. Все эти обстоятельства не позволяют при создании двигателей внутреннего сгорания сосредоточить большую мощность в одном агрегате.

От этих недостатков свободен двигатель внутреннего сгорания другого типа - **газотурбинная установка (ГТУ)**. Цикл газотурбинной установки состоит из тех же процессов, что и цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания, но существеннейшее различие заключается в следующем: если **в поршневом двигателе эти процессы происходят последовательно, один за другим, в одном и том же элементе двигателя - цилиндре**, то **в газотурбинной установке эти процессы происходят в различных элементах этой установки** и, таким образом, в ней нет такой неравномерности условий работы элементов двигателя, как в поршневом двигателе.

В газотурбинных установках средняя скорость рабочего тела в 50 - 100 раз выше, чем в поршневых двигателях. Все это позволяет сосредоточить **в малогабаритных газотурбинных установках большие мощности**. Термический КПД газотурбинных установок высок. Эти важные преимущества делают газотурбинную установку весьма перспективным двигателем.

В настоящее время газотурбинные двигатели широко применяются в авиации, на магистральных газопроводах, на колесных и гусеничных машинах, во флоте, в некоторых странах применяются на железнодорожном транспорте.

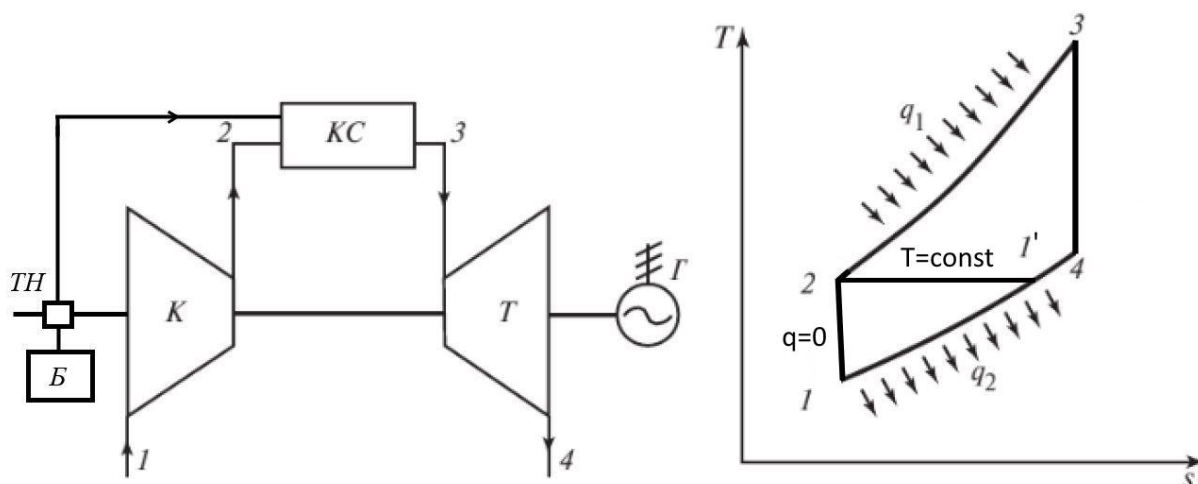
Циклы газотурбинных установок разделяются на те же группы, что и циклы поршневых двигателей: со сгоранием при $p = \text{const}$ и со сгоранием при $v = \text{const}$. Мы рассмотрим только циклы ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении, т.к. в связи со сложностями создания специальных камер сгорания ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме эти установки сколько-нибудь широкого распространения не получили.

Рассмотрим цикл простой ГТУ.

На общем валу находятся газовая турбина Т, компрессор К, топливный насос ТН и потребитель энергии Г. Компрессор засасывает атмосферный воздух, сжимает его до некоторого давления и направляет в камеру сгорания КС. Туда же топливным насосом из бака Б подается топливо, которое может быть как жидким, так и газообразным; в последнем случае вместо насоса применяется газовый компрессор.

Сгорание топлива происходит в камере сгорания при $p = \text{const}$. Продукты сгорания, расширившись в соплах газовой турбины, попадают на лопатки турбины, производят там работу за счет своей кинетической энергии и затем выбрасываются в атмосферу через

выпускной патрубков. Давление отработавших газов несколько превышает атмосферное (поскольку отработавшим газам нужно преодолеть сопротивление выходного патрубка).



Идеализованный цикл рассматриваемой газотурбинной установки изображен на $T-s$ - диаграмме.

Принцип построения этого идеализованного цикла такой же, как использованный ранее для поршневых двигателей: предполагается, что цикл замкнутый, т.е. количество рабочего тела в цикле сохраняется постоянным; выход отработавших газов в атмосферу заменяется изобарным процессом с отводом теплоты к холодному источнику; считается, что теплота подводится к рабочему телу извне, через стенки корпуса установки, а рабочим телом турбины является газ неизменного состава, например чистый воздух.

На $p-v$ - диаграмме процесс 1-2 представляет собой сжатие воздуха в компрессоре. Сжатие в компрессоре может быть адиабатным, изотермическим или политропным. Обычно давление в компрессоре не превышает 3 МПа. По изобаре 2-3 к рабочему телу подводится теплота (этот процесс соответствует сгоранию топлива в камере сгорания). Температура продуктов сгорания достигает 1000-1800К. Далее рабочее тело адиабатно расширяется в сопловом аппарате турбины и отдаёт работу турбинному колесу (3-4). Изобарный процесс 4-1 соответствует выходу отработавших газов из турбины. **Такие циклы часто называют разомкнутыми.**

Определим термический КПД цикла газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$, иногда называемого **циклом Брайтона**. Считаем рабочее тело идеальным газом с постоянной теплоемкостью. Значение η_T рассматриваемой установки будет различным в зависимости от процесса сжатия, осуществляемого в компрессоре (изотермического, адиабатного или политропного).

Рассмотрим вначале цикл газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$ с изотермическим сжатием воздуха в компрессоре. В этом случае теплота от рабочего тела к холодному источнику будет отводиться и в изобарном процессе 4-1, и в изотермическом процессе сжатия 1-2; при этом теплота, отводимая в изобарном процессе 4-1:

$$q_2' = c_p (T_1 - T_4) < 0, \quad (1)$$

а теплота, отводимая в изотермическом процессе 1-2:

$$q_2'' = RT_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) < 0 \quad (2)$$

таким образом, в сумме:

$$q_2 = q_2' + q_2'' = c_p (T_1 - T_4) + RT_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) < 0 \quad (3)$$

Теплота, подводимая к рабочему телу в изобарном процессе 2-3:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) > 0. \quad (4)$$

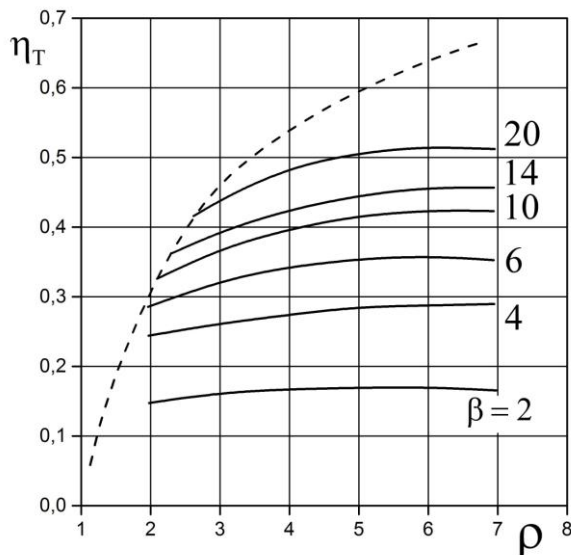
Подставляя эти значения и в общее соотношение для КПД, получаем:

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{|q_1|} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1) + RT_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right) + \left(1 - \frac{1}{k} \right) \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (5)$$

Используя обозначение для степени предварительного расширения $\rho = v_3/v_2$, и вводя новое обозначение $\beta = p_2/p_1$ - **степень повышения давления**, уравнение (5) можно привести к виду:

$$\eta_T = 1 - \frac{\left(\frac{k-1}{k} \right) \ln \beta + \rho \beta^{\frac{1-k}{k}} - 1}{\rho - 1}. \quad (6)$$

Зависимость η_T от ρ для разных значений β , описываемая уравнением (6), представлена на рисунке.



Из уравнения (6) можно найти максимальное значение η_T для каждой степени предварительного расширения ρ . Возьмем для этого первую производную от η_T по степени увеличения давления β при $\rho = \text{const}$. После соответствующих преобразований получим:

$$\left(\frac{\partial \eta_T}{\partial \beta}\right)_\rho = \frac{\rho}{\rho-1} \left(\frac{k-1}{k}\right) \beta^{\frac{1-2k}{k}} - \frac{1}{\rho-1} \left(\frac{k-1}{k}\right) \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

Приравнивая теперь это выражение нулю, получаем следующее условие максимального термического КПД:

$$\beta^{\max} = \rho^{\frac{k}{k-1}}; \quad \eta_T^{\max} = 1 - \frac{\ln \rho}{\rho-1} \quad (8)$$

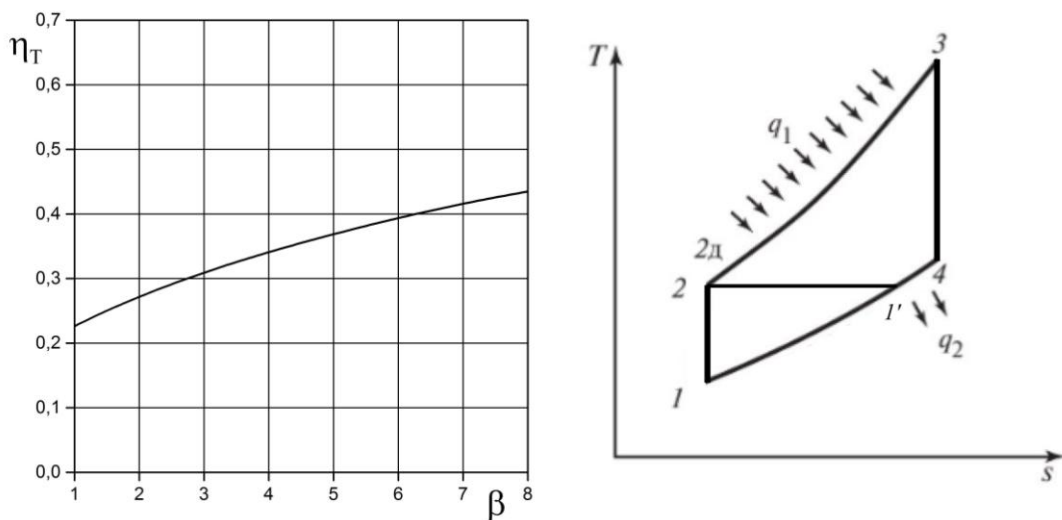
На рисунке максимальные значения η_T нанесены штриховой линией.

Рассмотрим теперь цикл газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$ для адиабатного сжатия воздуха в компрессоре. В данном случае:

$$\begin{aligned} q_2 &= c_p (T_1 - T_4) < 0 \\ q_1 &= c_p (T_3 - T_2) > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда следует, что термический КПД этого цикла определяется выражением:

$$\eta_T = 1 - \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} = 1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} \quad (10)$$



Сравнение эффективности циклов газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$ для изотермического и адиабатного сжатия, проводимое при условии равенства в обоих циклах подводимых теплот q_1 , максимальных давлений p_3 и максимальных температур T_3 цикла, показывает, что **термический КПД цикла с адиабатным сжатием превышает КПД цикла с изотермическим сжатием:**

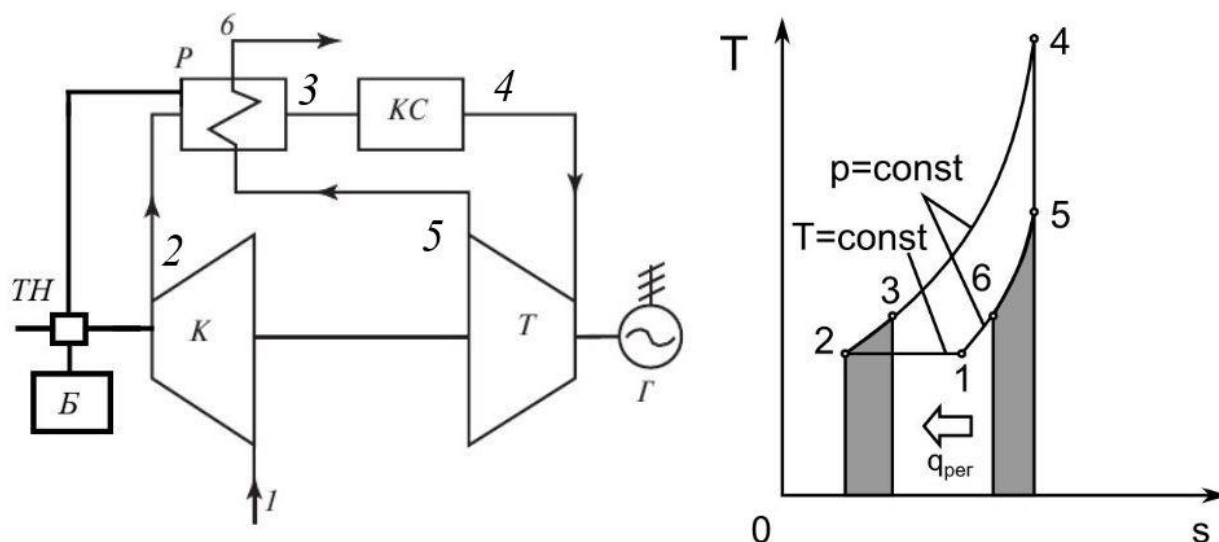
Понятно, что термический КПД газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$ для случая, когда сжатие воздуха осуществляется по политропе с показателем от 1 до k будет иметь промежуточное значение.

$$\eta_T^{\text{адиаб}} > \eta_T^{\text{политр}} > \eta_T^{\text{изотерм}} \quad (11)$$

2. ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ

Термический КПД газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$, как правило, невысок – 40-50%, что связано в значительной степени с высокой температурой выбрасываемого в атмосферу рабочего тела. В современных ГТУ эта температура может достигать $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если температура рабочего тела в точке 4 превышает температуру в точке 2, то очевидно можно использовать теплоту выбрасываемого газа для подогрева новой порции газа на входе в камеру сгорания. Подобное использование уходящих газов в ГТУ называется **регенерацией теплоты**.

Схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты представлена на рисунке.



Отличие газотурбинной установки с регенерацией теплоты от установки без регенерации состоит в том, что сжатый воздух поступает из компрессора К не сразу в камеру сгорания КС, а предварительно проходит через воздушный регенератор-теплообменник Р, в котором он подогревается за счет теплоты отработавших газов. Соответственно газы, выходящие из турбины, перед выходом их в атмосферу проходят через воздушный регенератор, где они охлаждаются, подогревая сжатый воздух. Таким образом, определенная часть теплоты, ранее уносившейся отработавшими газами в атмосферу, теперь полезно используется.

Рассматриваемый цикл состоит из процесса сжатия воздуха в компрессоре 1-2, который может быть как изотермическим, так и адиабатным, процесса 2-3, представляющего собой изобарный подогрев воздуха в регенераторе, изобарного процесса 3-4, соответствующего подводу теплоты в камере сгорания за счет сгорания топлива, процесса адиабатного расширения газов 4-5 в турбине, изобарного охлаждения выхлопных газов в регенераторе 5-6 и, наконец, замыкающего цикл условного изобарного процесса 6-1.

Полнота регенерации теплоты обычно определяется **степенью регенерации**:

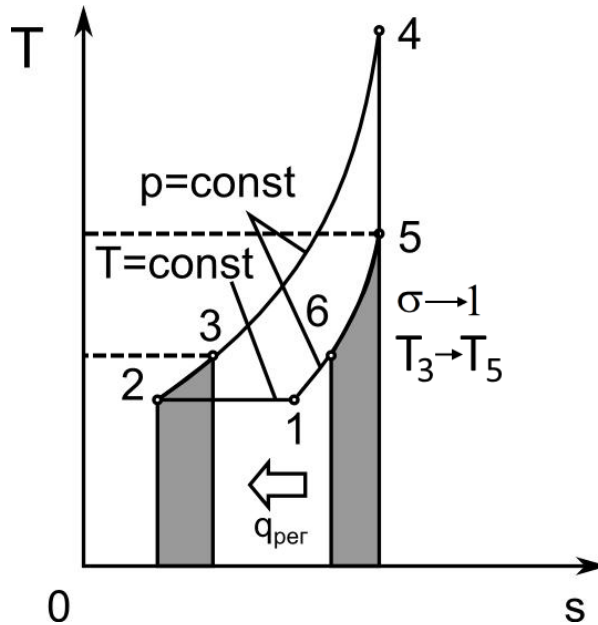
$$\sigma = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} < 1 \quad (12)$$

т.е. по существу отношением теплоты, которая была фактически использована в процессе регенерации (процесс 2-3), к располагаемой теплоте, соответствующей возможному перепаду температуры от T_5 до T_2 . В противоточных теплообменниках регенераторах T_3 может быть равно T_5 .

Теплота, воспринятая сжатым воздухом в регенераторе, естественно, должна быть равна теплоте, отдаваемой в нем отработавшими газами, т.е.

$$c_p (T_3 - T_2) = c_p (T_5 - T_6). \quad (13)$$

Рассмотрим теперь цикл газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$, с регенерацией теплоты и с изотермическим сжатием воздуха в компрессоре. Такой цикл изображен на $T-s$ -диаграмме.



Подводимая и отводимая теплота в этом цикле

$$q_1 = c_p (T_3 - T_4) > 0, \quad (14)$$

$$q_2 = RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} + c_p (T_1 - T_6) < 0.$$

Теплота, отводимая с отработавшими газами, может быть определена следующим образом:

$$c_p (T_1 - T_6) = c_p (T_1 - T_5) - c_p (T_6 - T_5) = c_p (T_1 - T_5) - c_p (T_2 - T_3) < 0 \quad (15)$$

Термический КПД теперь может быть определен просто:

$$\eta_T = 1 - \frac{RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p (T_5 - T_1) - c_p (T_3 - T_2)}{c_p (T_4 - T_3)} = 1 - \frac{\left(\frac{k-1}{k}\right) \ln \frac{p_2}{p_1} + \left(\frac{T_5}{T_1} - 1\right) - \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}{\left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right)} \quad (16)$$

Обозначая отношения $v_4/v_3 = \rho$, $p_2/p_1 = \beta$, $T_3/T_2 = \gamma$, найдем теперь, чему равны отношения температур в уравнении (16):

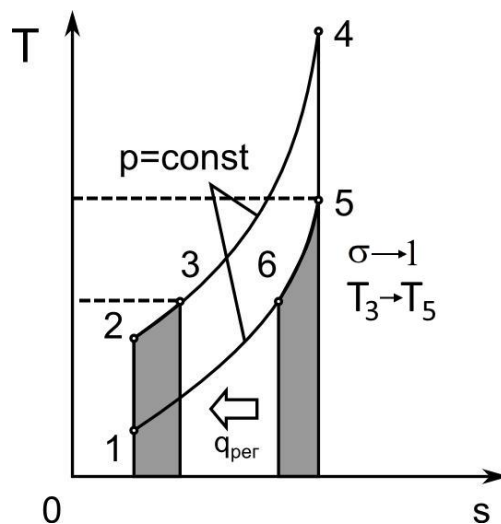
$$\eta_T = 1 - \frac{\left(\frac{k-1}{k}\right) \ln \beta}{\gamma(\rho-1)} + \frac{\rho \beta^{\frac{1-k}{k}} - 1}{\rho-1} \quad (17)$$

Из этого соотношения следует, что чем больше значение γ , характеризующее регенерацию, тем выше термический КПД газотурбинной установки.

При предельном значении степени регенерации $\sigma = 1$, $\gamma = T_5/T_1$. При этом вся располагаемая теплота отработавших газов используется для подогрева воздуха. **Такую регенерацию называют полной.** Очевидно, что этот случай может иметь лишь теоретическое значение, так как при нулевой разности температур между отработавшими газами и воздухом, имевшей бы место при полной регенерации, невозможен теплообмен в регенераторе. Максимально близкие к полной регенерации условия реализуются в противоточных теплообменниках.

Определим теперь термический КПД газотурбинной установки со сгоранием при $p = \text{const}$ с регенерацией при адиабатном сжатии воздуха. Подводимая и отводимая теплота в этом цикле:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_p (T_4 - T_3) > 0 \\ q_2 &= c_p (T_1 - T_6) < 0 \end{aligned} \quad (18)$$



Теплоту, отводимую с отработавшими газами, можно определить следующим образом:

$$c_p (T_1 - T_6) = c_p (T_1 - T_5) - c_p (T_6 - T_5) = c_p (T_1 - T_5) - c_p (T_2 - T_3) < 0 \quad (19)$$

Термический КПД теперь может быть определен просто:

$$\eta_T = 1 - \frac{c_p (T_5 - T_1) - c_p (T_3 - T_2)}{c_p (T_4 - T_3)} = 1 - \frac{\left(\frac{T_5}{T_2} - \frac{T_1}{T_2}\right) - \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}{\left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right)} \quad (20)$$

Проводя аналогичные рассуждения, получим:

$$\eta_T = 1 - \frac{\beta^{\frac{1-k}{k}} (\rho\gamma - 1) - (\gamma - 1)}{\gamma(\rho - 1)} \quad (21)$$

Полная регенерация также теоретически возможна при $\sigma = 1$, $\gamma = T_3/T_2 \rightarrow T_5/T_1$, $\rho = v_4/v_3$.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. На какие группы делятся циклы ГТУ по способу подвода теплоты к рабочему телу?
Ответ:
2. Какие циклы называют разомкнутыми?
Ответ:
3. Запишите формулы термического КПД цикла ГТУ при изотермическом и адиабатном сжатии в компрессоре.
Ответ:
4. Опишите суть процесса регенерации теплоты в ГТУ. Как регенерация влияет на термический КПД цикла ГТУ?
Ответ:
5. Запишите формулу термического КПД цикла ГТУ при адиабатном сжатии воздуха в компрессоре, со сгоранием при постоянном давлении и с регенерацией теплоты.
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: