

*О. И. Бунькова, Т. Ф. Богатова*

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

[tes.urfu@mail.ru](mailto:tes.urfu@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ ВПРЫСКА ПАРА В ГАЗОВУЮ ТУРБИНУ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛА

*В работе рассмотрено влияние применения впрыска пара в газовую турбину на показатели газотурбинного цикла. Приведены тепловые потоки, определяющие энергетический баланс газотурбинной установки, основные факторы, влияющие на изменение параметров работы ГТУ.*

*Ключевые слова: газовая турбина, впрыск пара, эффективность цикла, энергетический баланс*

*O. I. Bun'kova, T. F. Bogatova*

Ural Federal University, Ekaterinburg

## EFFECT OF STEAM INJECTION INTO GAS TURBINE ON CYCLE EFFICIENCY

*The influence of application of steam injection into the gas turbine on the gas turbine cycle performance are considered in the work. The main heat fluxes defining power balance of the gas turbine unit and main factors influencing the change of operating parameters are given.*

*Keywords: gas turbine, steam injection, cycle efficiency, energy balance*

Впрыск пара может улучшить как тепловую эффективность, так и выработку электроэнергии газотурбинными установками (STIG). По всему миру эксплуатируется более 100 газотурбинных установок с технологией впрыска пара [1]. Преимуществом этой технологии являются снижение образования оксидов азота в камере сгорания, а также использование пара вместо сжатого воздуха для снижения температура лопаток газовой турбины.

Для анализа влияния ввода пара в камеру сгорания (КС) газовой турбины необходимо определить энергетический баланс ГТУ. Некоторые параметры могут быть определены только с помощью данных производителей и сложных расчетов. Поэтому приводимые далее уравнения могут рассматриваться как базовые.

Принципиальная схема ГТУ приведена на рис. 1.

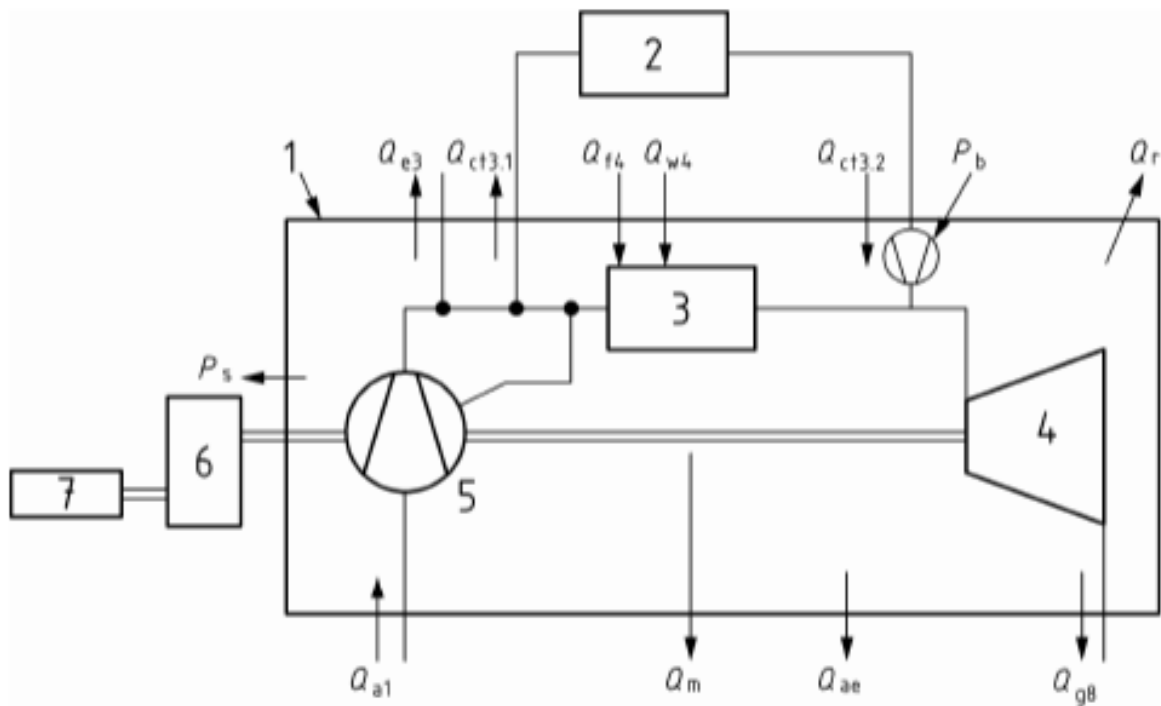


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинной установки [2]

1 – контролируемая зона; 2 – воздухоохладитель; 3 – камера сгорания (источник тепла); 4 – турбина; 5 – компрессор; 6 – редуктор; 7 – нагрузка

Энергетический баланс газовой турбины [2, 3]:

$$Q_{a1} + Q_{f4} + Q_{w4} + Q_{ct3.2} + P_b = P_3 + Q_{e3} + Q_{ct3.1} + Q_r + Q_{g8} + Q_{ae} + Q_m \quad (1)$$

где  $Q_{a1} = m_{a1} \cdot h_{a1}$  – тепловой поток, поступающий с воздухом на вход в компрессор;

$m$  – массовые расходы, кг/с;

$h$  – удельные энтальпии, кДж/кг;

$Q_{f4} = m_{f4} \cdot (Q_i^r + h_{f4} - h_0)$  – тепловой поток, вносимый с топливом;

$Q_{w4} = m_{w4} \cdot h_{w4}$  – тепловой поток, вносимый водой/паром;

$Q_{ct3.2} = m_{ct3} \cdot h_{ct3.2}$  – тепловой поток, вносимый охлаждающим воздухом из охладителя;

$P_b$  – потребляемая дожимным воздушным компрессором охлаждающего воздуха мощность;

$P_s = P_{e9} + Q_{GB} + Q_G$  – выходная мощность на валу ГТ ( $P_{e9}$  – электрический выход на клеммах генератора, кВт;  $Q_{GB}$  – потери в редукторе, кВт;  $Q_G$  – потери в генераторе, кВт);

$Q_{e3} = m_{e3} \cdot h_{a3}$  – тепловой поток с отбором воздуха;

$Q_{ct3.1} = m_{ct3} \cdot h_{a3}$  – тепловой поток с охлаждающим воздухом, подаваемым в воздухоохладитель;

$Q_r = (1 - \eta_{tc}) \cdot m_{f4} \cdot (Q_i^r + h_{f4} - h_0)$  – радиационные и конвективные тепловые потери;

$Q_{g8} = m_{g8} \cdot h_{g8}$  – тепловой поток с выхлопными газами турбины;

$Q_{ae} = m_{ae} \cdot h_{ae}$  – тепловой поток с утечками из регулируемого объема

$Q_m$  – механические потери.

Таким образом, энергетический баланс газотурбинной установки можно записать:

$$m_{a1} \cdot h_{a1} + m_{f4} \cdot (Q_{lo} + h_{f4} - h_0) + m_{w4} \cdot h_{w4} + m_{ct3} \cdot h_{ct3.2} + P_b = P_s + m_{e3} \cdot h_{a3} + m_{ct3} \cdot h_{a3} + (1 - \eta_{tc}) \cdot m_{f4} \cdot (Q_{lo} + h_{f4} - h_0) + m_{g8} \cdot h_{g8} + m_{ae} \cdot h_{ae} + Q_m \quad (2)$$

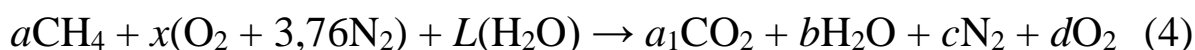
Массовый расход выхлопных газов на выходе из газовой турбины определяется как:

$$m_{g8} = m_{a1} + m_{f4} + m_{w4} - m_{e3} - m_{ae} \quad (3)$$

Реакцию горения в КС в общем виде можно записать:

*Топливо + Окислитель + впрыскиваемый пар → Продукты горения*

Для случая сжигания природного газа (содержащего 95–98 % метана) можно записать:



Число молей топлива ( $a$ ), воздуха ( $x$ ) и впрыскиваемого пара ( $L$ ) рассчитывается делением массового расхода на молекулярный вес соответствующего компонента (в случае воздуха необходимо учитывать, что каждый моль  $\text{O}_2$  «сопровождается» 3,76 молями  $\text{N}_2$ ):

$$a = \frac{m_{f4}}{M_f}; \quad x = \frac{m_{a1}}{4,76 \times 28,97}; \quad L = \frac{m_{w4}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Расход воздуха через компрессор не изменяется, а расход газов через газовую турбину изменяется с изменением количества

впрыскиваемого пара в КС (как правило, количество пара, отбираемого из парового цикла, не превышает 10 %). Расход топлива ( $m_{f4}$ ), который необходим для обеспечения заданной температуры на входе в ГТ, может быть определен методом последовательных приближений (учитывая, что топливо реагирует и с воздухом, и с водяным паром).

Приведенные в [4] данные показывают, что с увеличением количества вводимого в камеру сгорания пара производительность газотурбинного цикла возрастает, рис. 2.

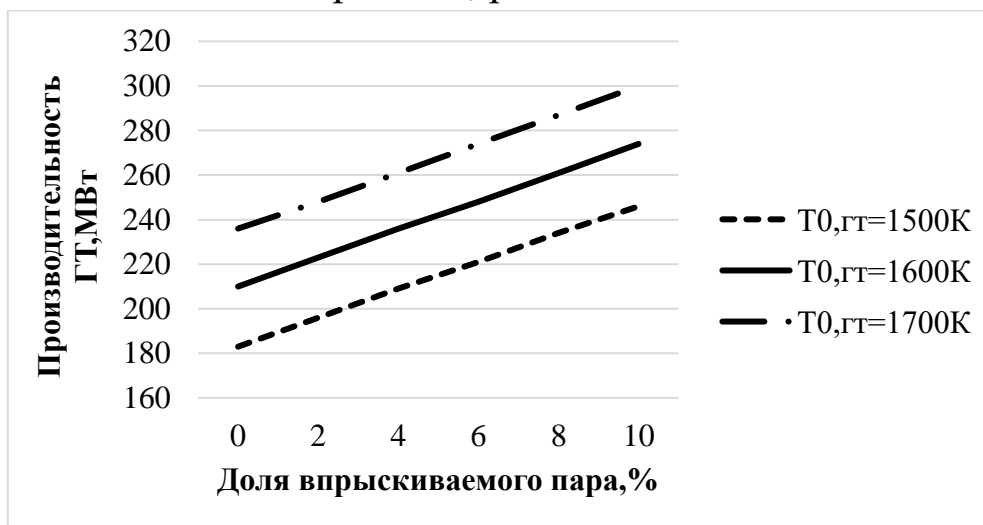


Рис. 2. Влияние доли впрыскиваемого в КС пара на производительность газотурбинного цикла [4]

Поскольку верхний газотурбинный цикл обеспечивает наибольший вклад в экономичность комбинированного цикла, то с повышением его эффективности существенно возрастает эффективность комбинированного цикла в целом.

#### Список использованных источников

1. Poullikkas A. Review an overview of current and future sustainable gas turbine technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2005. Vol. 9, Is. 5. P. 409–443.
2. International Standard ISO 2314:2009 (E). Gas turbines – Acceptance tests, 2009. 114 p.
3. ГОСТ Р 55798-2013 (ИСО 2314:2009) Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания. Введ. 01.01.2015. М. : Стандартинформ, 2015. 45 с.
4. Reddy B. V. Effect of Steam Injection in Gas Turbine Combustion Chamber on the Performance of a Natural Gas Fired Combined Cycle Power Generation Unit // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 110–116. P. 4574–4577.