

СПОСОБ ФОРСИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Письменный В.Л.

Филиал «Взлет» Московского авиационного института в г. Ахтубинске

Ключевые слова: газотурбинная установка, технология STIG, внутренний термодинамический цикл, энергосбережение.

Аннотация. Предложен способ повышения топливной эффективности газотурбинных установок. Ожидаемое повышение эффективного КПД более 70 %.

METHOD OF FORCING A GAS TURBINE INSTALLATION

Pismennyi V.L.

Branch “Vzlet” of Moscow Aviation Institute, Ahtubinsk

Keywords: gas turbine installation, STIG technology, Internal thermodynamic cycle, energy saving.

Abstract. A method for increasing the fuel efficiency of gas turbine plants is proposed. Expected increase in effective efficiency over 70 %.

В соответствии с прогнозом экономического развития России на период до 2030 г. добыча нефти и газа сократится ~ 1,2 раза при одновременном росте спроса на углеводородное топливо. Негативное влияние этого процесса проявляется уже сегодня: расходы на газ и нефтепродукты постоянно увеличиваются. В свете этого становится весьма актуальной проблема повышения эффективности тепловых машин как основных потребителей углеводородных топлив. Сегодня средний уровень КПД тепловых машин в теплоэнергетике страны не превышает 30 %, что недостаточно. Основная причина в том, что большинство из существующих энергетических установок используют простые термодинамические циклы, КПД которых даже при предельно допустимых значениях рабочих параметров не превышает 45 % [1]. Использование комбинированных термодинамических циклов, в частности бинарных [1], позволяет повысить КПД тепловых машин. Исходя из этого, одним из перспективных направлений в теплоэнергетике является создание парогазовых установок (технология STIG), эффективный КПД которых приближается к 60 %.

Известно, что термодинамическая эффективность газотурбинных установок (ГТУ) повышается при увеличении степени повышения давления воздуха π (отношение давления воздуха за компрессором к атмосферному давлению) и подогрева газа Δ (отношение температуры газа перед турбиной к температуре воздуха на входе в компрессор), которые в ГТУ ограничены.

Автор предлагает способ форсирования ГТУ [2], основанный на использовании так называемых внутренних термодинамических циклов [3].

Внутренний цикл – это цикл, имеющий энергообмен с внешним циклом. Внешний цикл – это цикл, имеющий энергообмен с внешней средой. Отсутствие во внутреннем цикле энергообмена с внешней средой по определению означает отсутствие внешних потерь, а следовательно, термический КПД этого цикла в

составе тепловой машины равен единице (вся теплота, а это разница между полученной и возвращенной внешнему циклу теплотой, преобразуется в работу). Внутренние термодинамические циклы расширяют ограничения ГТУ по π и Δ .

Газотурбинная установка (рис. 1) состоит из входного устройства 1, компрессора низкого давления 2, камеры смешения 3, внутри которой расположен водяной коллектор 4, компрессора высокого давления 5, камеры сгорания 6, турбины 7, теплообменника-конденсатора 8, выходного устройства 9, насосов (н). Теплообменник-конденсатор входит в состав паросиловой установки, рабочим телом которой является вода (пар). Турбина 7 приводит в действие компрессоры низкого и высокого давлений, генератор электрической энергии (на рис. 1 не показан).

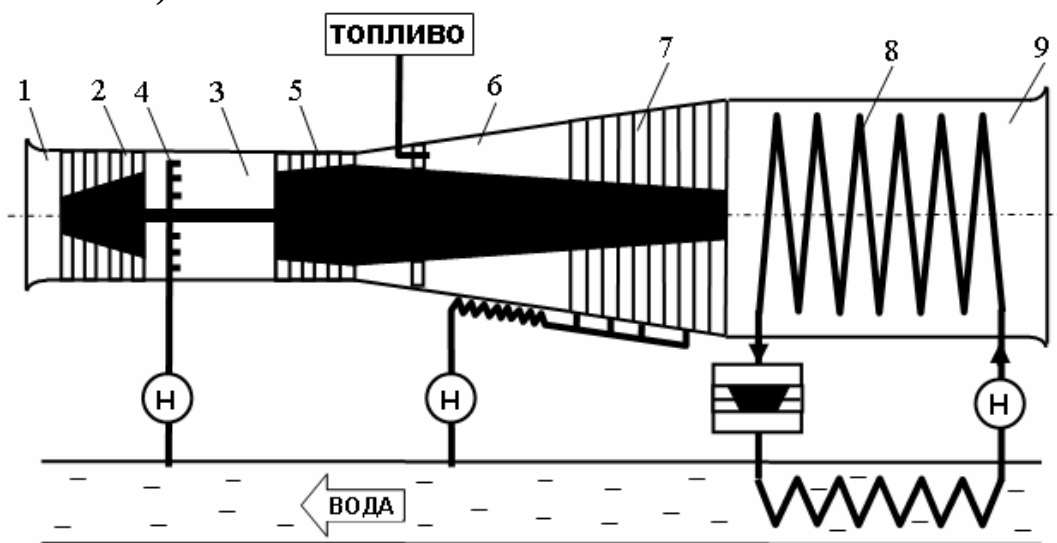


Рис. 1. Газотурбинная установка

Воздух через входное устройство попадает в компрессор низкого давления, где сжимается и нагревается, после чего поступает в камеру смешения. Туда же через коллектор подается вода. Вода смешивается с воздухом и испаряется. Температура воздуха понижается. Образовавшаяся паровоздушная смесь поступает в компрессор высокого давления, где сжимается и нагревается.

Сжатая и нагретая в компрессоре высокого давления паровоздушная смесь поступает в камеру сгорания ГТУ.

В камере сгорания паровоздушная смесь смешивается с топливом, которое сгорает. Образующийся при этом горячий газ поступает в турбину, которая совершает механическую работу. Для увеличения работы статическое давление на выходе из турбины поддерживается меньше атмосферного (за счет более высокой скорости истечения газа из последней ступени турбины). Работа турбины тратится на привод компрессоров, насосов и электрогенератора.

Оставшаяся после прохождения турбины теплота преобразуется в паросиловой установке (передается через теплообменник-конденсатор) в механическую работу и горячую воду, удаляется (с конденсатом) через выходное устройство в атмосферу.

Для охлаждения камеры сгорания и рабочих лопаток турбины используется вода, которая через каналы в корпусе камеры сгорания (водяная рубашка) поступает в виде пара в рабочие лопатки турбины, и далее в газовоздушный тракт.

На рис.2 в P - v координатах показан термодинамический цикл ГТУ (рис.1). Цикл состоит из внешнего цикла $L_{ц1}$ (цикл Брайтона с отводом теплоты при сжатии) и двух внутренних циклов: $L_{ц2}$ (цикл Письменного) и $L_{ц3}$ (цикл Ренкина). Внешний цикл имеет энергообмен с внешней средой, внутренние – с внешним циклом. К внешнему циклу подводится теплота Q_1 , отводится – Q_r . Термический к.п.д. ГТУ определяется как $\eta_t = 1 - Q_r/Q_1$.

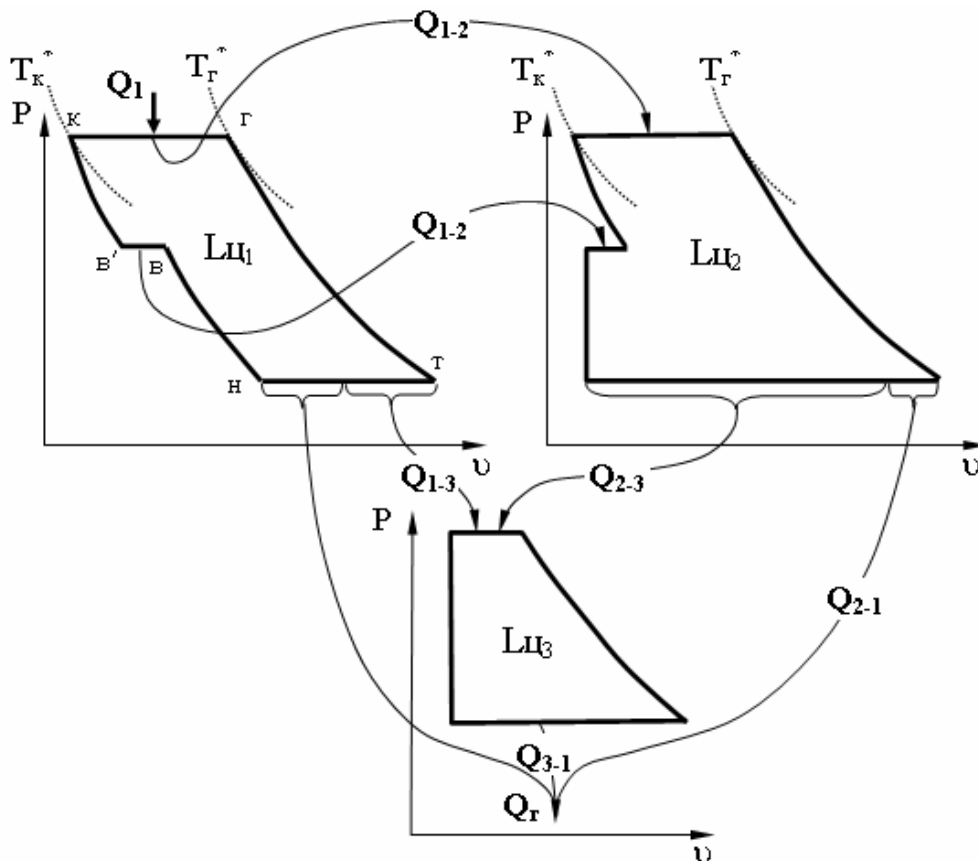


Рис. 2. Термодинамический цикл ГТУ

Тепловые потоки показаны здесь же. К внешнему циклу, как уже сказано, подводится теплота Q_1 (процесс к-г). Часть этой теплоты преобразуется в работу $L_{ц1}$, которая используется для сжатия рабочих тел внутренних циклов (в насосах (н) и компрессоре высокого давления), для привода электрогенератора, а также – для компенсации всевозможных потерь, в том числе во внутренних циклах. Другая часть теплоты (Q_{1-2} и Q_{1-3}) передается во внутренние циклы, в которых преобразуется в работу $L_{ц2}$ и $L_{ц3}$. Нереализованная во внутренних циклах теплота (Q_{2-1} и Q_{3-1}) возвращается (условно) внешнему циклу, после чего рассеивается в атмосфере в виде теплоты Q_r . Общая работа цикла ГТУ определяется как $L_{ц} = L_{ц1} + m_2 \cdot L_{ц2} + m_3 \cdot L_{ц3}$, где m_2 и m_3 – относительные расходы рабочих тел во внутренних циклах.

На рис. 3 показаны характеристики ГТУ в зависимости от суммарной степени повышения давления воздуха π_{Σ} .

Условные обозначения: $\pi_{кнд}$ – степень повышения давления воздуха в компрессоре низкого давления, $\pi_{квд}$ – степень повышения давления воздуха в компрессоре высокого давления; m_2 и m_3 – относительные расходы рабочих тел внутренних циклов; $T_{кнд}^*$ – температура воздуха на выходе из компрессора

низкого давления; $T_{квд}^*$ – температура паровоздушной смеси на выходе из компрессора высокого давления; T_r^* – температура газа на входе в турбину; Ne – удельная мощность ГТУ; $\eta_{e\Sigma}$ – суммарный эффективный КПД ГТУ, η_e – эффективный КПД ГТУ (без паросиловой установки).

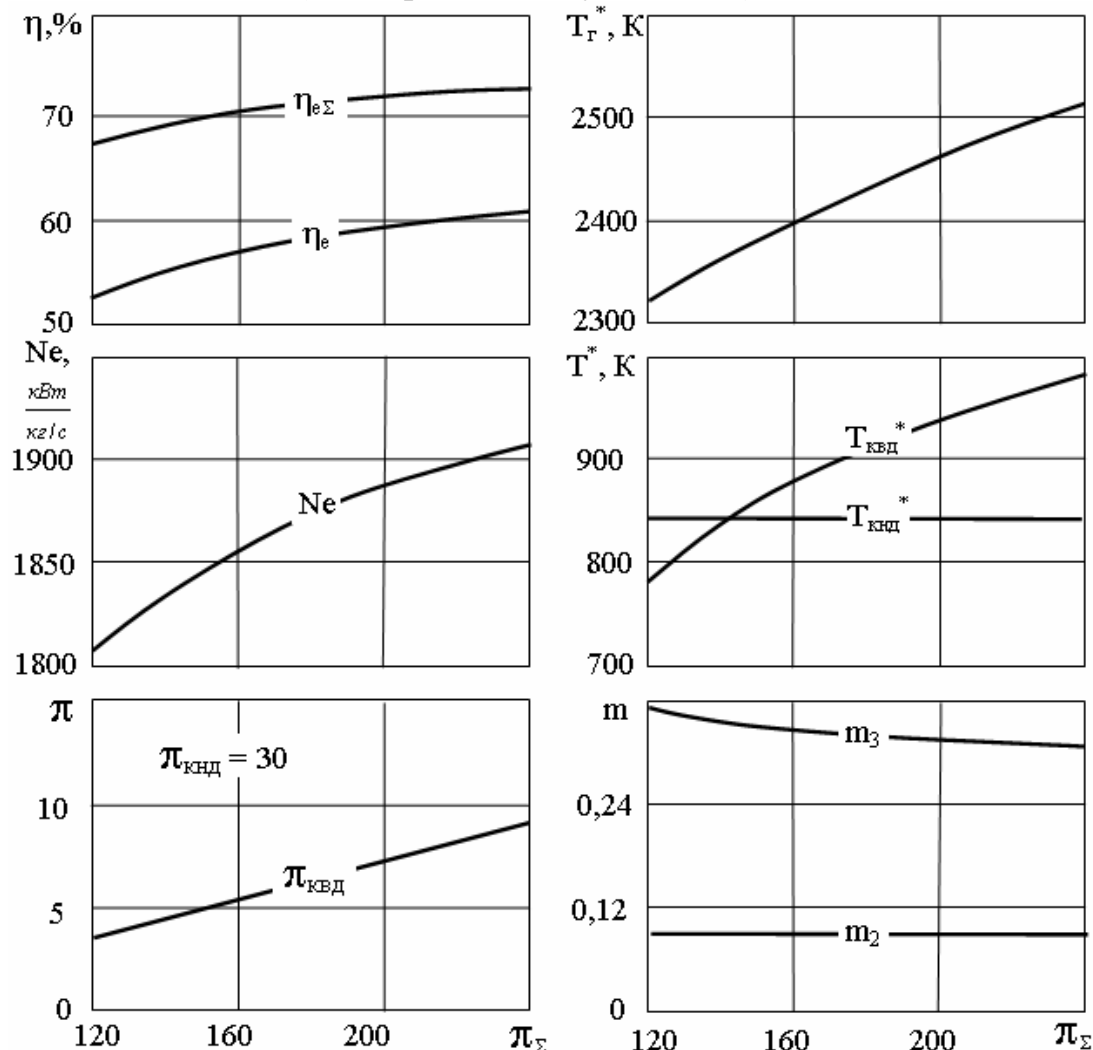


Рис. 3. Характеристики ГТУ

Исходные данные ГТУ: внешние условия – стандартные; топливо – керосин; рабочее тело паросиловой установки – вода (пар); коэффициент избытка воздуха в камере сгорания – 1,1; степень повышения давления в компрессоре низкого давления – 30; температура лопаток первой ступени турбины – 1250 К; коэффициент интенсивности охлаждения лопаток турбины – 0,65; КПД компрессора низкого давления – 0,83; КПД компрессора высокого давления – 0,83; КПД турбины – 0,95; КПД паровой турбины – 0,9; механический КПД – 0,99; полнота сгорания топлива – 0,99; коэффициент восстановления давления в камере смешения – 0,95; коэффициент восстановления давления в камере сгорания – 0,95.

Видно, что цикл ГТУ (рис.3) в сочетании с авиационно-космическими технологиями (высокие КПД элементов, паровое охлаждение рабочих лопаток турбины, монокристаллические лопатки, керамические сопловые аппараты, «водяная рубашка», технология «blisk» и д.р.) позволяет повысить эффективный КПД ГТУ до 70÷75 %.

Для России разработка и внедрение высокопроизводительных ГТУ (КПД ~ 70% и более) является национальной задачей. Большая часть запасов углеводородных топлив находится в северных широтах, что делает их добычу и доставку крайне затратными. Высокоэффективная переработка углеводородных топлив в электроэнергию в местах их добычи позволит, во-первых, решить проблему доставки энергии потребителю (ЛЭП), во-вторых, проблему обустройства северных городов по образцу той же Исландии (количество тепловой энергии, выделяющееся при переработке топлива в электроэнергию, учитывая объемы добычи топлива, соизмеримо с энергией геотермальных источников).

Список литературы

1. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М: Энергия, 1968. 496 с.
2. Патент № 2674089 РФ. Способ форсирования газотурбинной установки / Письменный В.Л. – Оpubл. 04.12.2018, Бюл. № 34.
3. Письменный В.Л. Внутренние термодинамические циклы // Конверсия в машиностроении. 2006. № 3. С. 5-10.

Сведения об авторе

Письменный Владимир Леонидович – к.т.н., доцент кафедры испытаний авиационной техники, филиал «Взлет» МАИ, Ахтубинск.