

УДК 62-8: 621.438

ПАРАФЕЙНИК В.П.

ОАО "Сумское НПО им. М.В.Фрунзе"

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА

На основі системного підходу з використанням методу ексергетичного аналізу термодинамічної системи, яка складається з газотурбінного приводу, турбокомпресора природного газу та допоміжного обладнання, розроблено модель для аналізу ефективності роботи згаданої системи. З використанням експериментальних даних виявлено оптимальний режим роботи приводу турбокомпресорного агрегату.

На основе системного подхода с использованием метода эксергетического анализа термодинамической системы, состоящей из газотурбинного привода, турбокомпрессора природного газа и вспомогательного оборудования, разработана модель для анализа эффективности работы указанной системы. С использованием экспериментальных данных установлен оптимальный режим работы привода турбокомпрессорного агрегата.

On the basis of system approach and using method of exergetique analysis for thermodynamic system consisting of gas turbine drive, natural gas turbocompressor, and auxiliaries, the model for the analysis of the specified system efficiency has been developed. With the use of experimental data, there has been established the optimum operating mode for drive of turbocompressor package.

c – теплоемкость;
 D – диссипация эксергии;
 E – эксергия потока газа;
 e – удельная эксергия газа;
 G – массовая производительность;
 N – мощность;
 n – частота вращения;
 Q – количество теплоты, теплотворная способность топлива;
 T – температура;
 η – коэффициент полезного действия;
 Δ – часть целой величины;
 δ – величина соотношения удельной термомеханической и химической эксергии;
 Σ – знак суммы величин.

Сокращения

ГТД – газотурбинный двигатель;
 ГТП – газотурбинный привод;
 ГТУ – газотурбинная установка;
 K – коэффициент;
 КПД – коэффициент полезного действия;
 КС – компрессорная станция;
 ТВГ – теплота выхлопных газов;
 ВГ – выхлопные газы;
 ТКА – турбокомпрессорный агрегат;
 ТКУ – турбокомпрессорная установка;

СТ – свободная турбина;
 ТГ – топливный газ;
 ТС – техническая система;
 ЦВ – цикловой воздух;
 ЦК – центробежный компрессор.
Индексы верхние
 ', " – значения параметров на входе и выходе;
 opt – оптимальное значение;
 гтд – параметр двигателя;
 гтп – параметр привода;
 ном – номинальное значение;
 р – расчетная величина;
 тг – параметр топливного газа;
 тка – параметр турбокомпрессорного агрегата;
 утвг – параметр, получаемый при утилизации теплоты выхлопных газов;
 цк – параметр центробежного компрессора;
 э – параметр электроагрегата.

Индексы нижние

e – эффективное значение;
 ex – эксергетический параметр;
 g – параметр, относящийся к массовой производительности;
 i – текущее значение параметра;
 m – среднее значение параметра;
 max – максимальное значение параметра;

Q – параметр теплового потока;
 tr – транзитная эксергия;
 $вг$ – выхлопные газы;

$цв$ – цикловой воздух;
 $ст$ – свободная турбина;
 $тг$ – топливный газ.

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами

Блочно-комплектные ТКУ газовой и нефтяной промышленности, создаваемые на основе ГТП и ЦК высокого давления, являются сложным комплексом оборудования, обладающим основными свойствами систем, к которым относятся “...интерэктность (наличие взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем) и эмерджентность (способность порождения новых, присущих целому – системе, системных, интегративных свойств)” [1]. В процессе проектирования компрессорного оборудования возникает необходимость в комплексном исследовании такой ТС, в состав которой, кроме ТКА с газотурбинным приводом авиационного, судового или промышленного типа, входят вспомогательные системы-охлаждения, сепарации двухфазных углеводородных смесей и разнообразное вспомогательное оборудование, потребляющее электроэнергию и газ высокого давления. Методической основой термодинамического анализа эффективности таких ТС может быть эксергетический метод [2]. Как показали исследования, преимущественное влияние на эффективность исследуемой ТС оказывают ГТП и ЦК. Выявление и анализ их совместной (системной) термодинамической характеристики позволит установить оптимальный режим работы привода, что является исходной предпосылкой для оценки термодинамической эффективности ТКУ, а также КС.

Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем. ГТП компрессорного агрегата является сложной термодинамической и механической системой, состоящей из ГТД и вспомогательного оборудования (систем подготовки циклового воздуха, выхлопа, вентиляции отсека двигателя, подготовки ТГ, пожаротушения и т.д.). С целью осуществления более глубокого анализа с учетом физических особенностей процессов, происходящих в ГТП, в работах [3,4] использован эксергетический КПД:

$$\eta_{ex}^{ГТД} = \frac{N_{П}}{E_{подв} - \Delta E_{вг}} \quad (1)$$

Наиболее детально эксергетический баланс по элементам потерь ГТУ рассмотрен в работе [3]. Однако в этой и других известных работах ГТУ рассматривается как привод электрогенератора. Энергоэксергетический анализ ГТУ осуществлен также в работе [5]. Однако, это работа посвящена анализу работы ГТУ, обеспечивающей наддув воздуха в тепловой двигатель. Работа представляет значительную ценность в методическом плане, но не отражает особенностей работы ГТП в составе ТКА газовой или нефтяной промышленности. Первой попыткой применения эксергетического метода к анализу эффективности ТКУ газовой и нефтяной промышленности была работа [6]. Ее недостатком было отсутствие системного подхода к анализу рабочего процесса ТКУ в постановке [1]. ГТП рассматривался как генератор механической энергии ТКУ, а взаимное влияние характеристик ГТД и ЦК, как основных элементов ТКУ, при эксергетическом анализе не учитывалось.

Цель исследования. Целью настоящего исследования является выявление системной характеристики ТКА на основе анализа его эксергетического баланса с целью определения оптимального режима ГТД с учетом газодинамической характеристики ЦК, как одного из основных элементов исследуемой ТС.

Результаты исследований. Энергетические характеристики рабочих процессов, осуществляемых в отдельных системах ГТП, имеют различную физическую природу. В связи с этим при оценке его термодинамической эффективности требуется осуществить его эксергетический анализ. Анализ ГТП агрегата или установки связан с некоторыми особенностями, что обусловлено наличием ярко выраженной зоны максимального значения КПД ЦК и характером зависимости эффективного КПД от мощности СТ, т.е. $\eta_e = f(N_{СТ})$. Кроме того, характерной особенностью работы ГТП в составе ГПА является необхо-

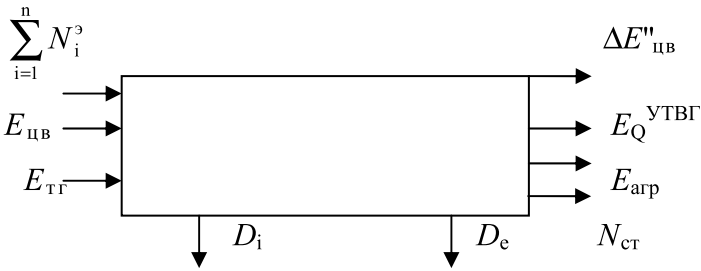


Рис. 1. Эксергетический баланс газотурбинного привода:

$\sum_{i=1}^n N_i^э$ – суммарная мощность потребителей электроэнергии; $E_{цв}$ – поток эксергии, подводимый на вход ГТД с ЦВ; $E_{тг}$ – поток эксергии, подводимый в КС с ТГ; $E''_{цв}$ – поток эксергии, затрачиваемый в связи с отбором части ЦВ для обогрева отсеков ТКА и работы СПЦВ; $E_Q^{УТВГ}$ – полезно используемая (утилизируемая) часть эксергии потока ВГ.

димность изменения в широком диапазоне значений частоты вращения ротора СТ ГТД в процессе эксплуатации.

Эксергетический баланс ГТП газоперекачивающего агрегата представлен на рис. 1.

Границы анализируемой системы при этом определяются сечениями на входе и выходе из ГТП, на входе в дозатор ТГ и на муфте привода.

Уравнение эксергетического баланса, составленное на основе рис. 1, имеет вид

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} \left(E_{\text{тг}} + E'_{\text{цв}} + \sum_{i=1}^n N_i \right) = N_{\text{ст}} + E_Q^{\text{УТВГ}} + E_{\text{агр}} + \Delta E''_{\text{цв}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{тг}} = G_{\text{тг}}(e_{\text{т}}^{\text{тг}} + e_{\text{х}}^{\text{тг}})$, – поток эксергии ТГ; для удельной химической эксергии принимается $e_{\text{х}} \approx Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$ [7], а $e_{\text{т}}$ вычисляется с использованием известной зависимости [8]); $E_{\text{цв}} = G_{\text{цв}} e_{\text{цв}}$, – эксергия потока ЦВ; $E_Q^{\text{УТВГ}} = Q \cdot \eta_{\text{с}} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right)$ – утилизируемый поток эксергии ТВГ, при этом Q –

полезно используемая часть ТВГ; $\eta_{\text{с}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right)$ –

фактор Карно [9]; $\Delta E''_{\text{цв}} = \sum_{i=1}^n (\Delta G_{\text{цв}})_i \cdot c \left[(T_{\text{цв}})_i - T_0 \right]$ – потеря эксергии с отборами ЦВ; где $(\Delta G_{\text{цв}})_i$ – массовый расход ЦВ в единицу времени с i -ми параметрами. Таким образом, в соответствии с выражением (2), а также рекомендациями об учете транзитной эксергии ($E_{\text{тр}}$) при определении эксергетического КПД [10], зависимость для определения $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ будет иметь вид:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} = \frac{N_{\text{ст}} + E_Q^{\text{УТВГ}} + E_{\text{агр}} + \Delta E''_{\text{цв}} - E_{\text{тр}}}{E_{\text{тг}} + E'_{\text{цв}} + \sum_{i=1}^n N_i - E_{\text{тр}}}. \quad (3)$$

При отсутствии условий для обледенения величина $\Delta E''_{\text{цв}} = 0$. Величины $E_{\text{агр}}$, а также $\sum_{i=1}^n N_i$

при работе агрегата на магистраль составляют менее 0,5 % от $N_{\text{ст}}$ и могут не учитываться. Эксергия цв в ГТП является транзитной эксергией, т.е. $E_{\text{цв}} = E_{\text{тр}}$. С учетом допущения о том, что удельная эксергия ВГ по условиям рабочего процесса в камере сгорания $e_{\text{вг}} \approx (e''_{\text{т}})_{\text{цв}}$, уравнение (3) после несложных преобразований приобретает вид:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} = \frac{N_{\text{ст}} + K_{\text{ут}} \left[G_{\text{цв}} \left(1 - \frac{e'_{\text{цв}}}{e_{\text{вг}}} \right) + G_{\text{тг}} \right] e_{\text{вг}}}{G_{\text{тг}} \cdot e_{\text{х}}^{\text{тг}} \cdot \left(1 + \frac{e_{\text{т}}^{\text{тг}}}{e_{\text{х}}^{\text{тг}}} \right)}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ут}}$ – коэффициент утилизации теплоты, отводимой от ГТД с ВГ. Остальные обозначения приведены выше.

Второе слагаемое в числителе выражения (4) определяет полезно используемую часть тепловых ресурсов, уходящих из ГТД с ВГ при наличии в составе ГТП котла-утилизатора. Котел в зависимости от схемы ГТП может использоваться для осуществления теплофикационного цикла или повышения КПД ГТД. Для ГТД с простым рабочим циклом и при отсутствии теплофикационного цикла величина

$$K_{\text{ут}} \left[G_{\text{цв}} \left(1 - \frac{e'_{\text{цв}}}{e_{\text{вг}}} \right) + G_{\text{тр}} \right] = 0, \text{ т.к. вся теплота ВГ}$$

рассеивается в окружающей среде, увеличивая тем самым диссипацию эксергии D_e за счет увеличения доли внешних потерь (рис.1).

Для ГТД с простым рабочим циклом, при котором $E_Q^{\text{ут}} = 0$, $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ на основании зависимости (4) будет определяться выражением:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} = \frac{N_{\text{ст}}}{G_{\text{тр}} \cdot e_x^{\text{тр}} (1 + \delta)} = \frac{\eta_e^{\text{ГТП}}}{(1 + \delta)}, \quad (5)$$

где $\delta = e_t^{\text{тр}}/e_x^{\text{тр}}$ – величина, учитывающая термомеханическую составляющую потока эксергии ТГ, определяемая по величине давления и температуре газа на входе в дозатор топлива.

Таким образом, принятое в известной литературе положение о том, что $\eta_e^{\text{ГТП}}$ может приравниваться к величине $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$, справедливо при условии отсутствия утилизационного цикла в составе привода и неучета потока термомеханической эксергии ТГ на входе в газогенератор двигателя.

На рис.2 представлены эффективный КПД современного двигателя НК-36СТ конструкции АО "СНТК им. Н.Д. Кузнецова", используемого в составе ГТП агрегата типа ГПА-Ц-25, а также его эксергетический КПД в зависимости от массовой производительности агрегата. Расчеты выполнялись для $T_a = 288\text{K}$, $P_a = 10330\text{ кПа}$ при следующих параметрах ГТП: коэффициенты восстановления давления $\sigma_{\text{вх}} = 0,98$; $\sigma_{\text{вых}} = 0,96$; коэффициент полноты сгорания в камере газогенератора 0,99; отбор воздуха на нужды ТКА 2,0 кг/с. Остальные параметры НК-36СТ, необходимые для расчетного анализа, принимались согласно данным работы [11]. Анализ работы ГТП на основе НК-36СТ осуществлялся при температуре ТГ 303К, величина Q_H^p ТГ составляла 50 мДж/кг. Как видно из рис. 2, максимальные значения $\eta_e^{\text{ГТП}}$ для расчетных значений T_a составляют 0,313...0,345 при частоте вращения ротора СТ $n_{\text{ст}} = 3750...5000\text{ мин}^{-1}$ и мощности на валу СТ 22,75...25,0 МВт, соответственно. Исходя из баланса мощности ЦК ПГ и СТ, с использованием зависимости (5) и с учетом ограниче-

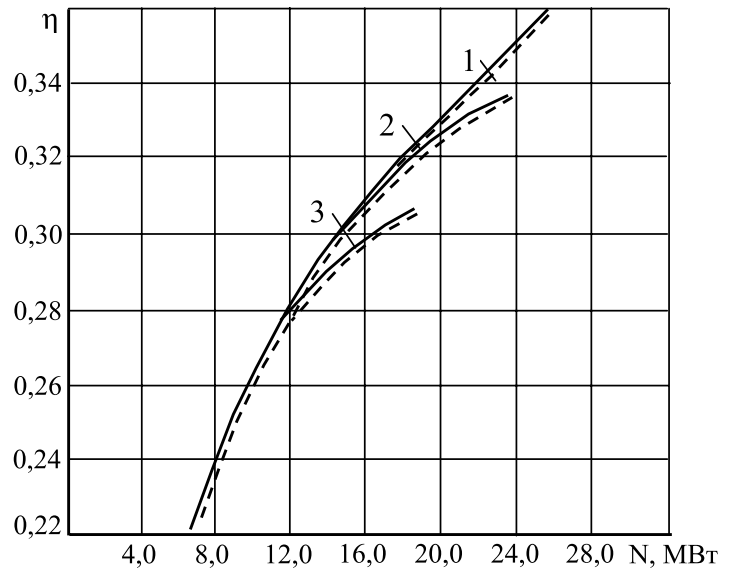


Рис. 2. Зависимость величины эффективного (—) и эксергетического (----) КПД газотурбинного привода на основе НК-36СТ в составе агрегата при различной частоте вращения ротора от величины мощности СТ:
1 – $n=5000\text{ мин}^{-1}$; 2 – 4500 мин^{-1} ;
3 – 3750 мин^{-1} .

ний по мощности СТ, определялась величина $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ в диапазоне массовых расходов газового компрессора 162,0...605,4 кг/с. Это соответствует диапазону мощности ГТП 8,7...28,5 МВт, а значения $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ составляли при этом 0,31...0,34. Как показывает анализ, значения $\eta_e^{\text{ГТП}}$ и $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ весьма близки, но смысл их совершенно различен. Если $\eta_e^{\text{ГТП}}$ является условным показателем эффективности, определяемым путем сопоставления мощности СТ и величины теплового потока, создаваемого в газогенераторе двигателя при сгорании ТГ, то величина $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ показывает, какая часть потока эксергии, подведенной с топливом, превращается в полезную мощность. Кроме того, следует подчеркнуть, что величина $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$ может быть интегральным показателем эффективности привода, т.е. ГТД и вспомогательных систем в его составе. Таким образом, он может служить объективным критерием эффективности для сравнения блочнокомплектных ГТП, изготавливаемых различными производителями. Однако в настоящее время ГТД поставляется специализированными предприятиями авиационной и судо-

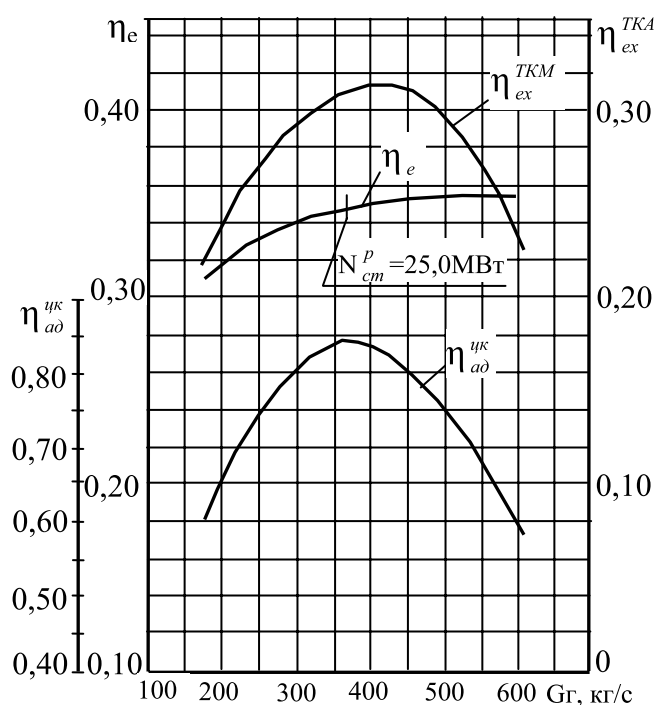


Рис. 3. Показатели эффективности привода на основе ГТД НК-36СТ (η_e), компрессора ГЦ-580/52-76 ($\eta_{ад}^{цк}$) и турбокомпрессорного агрегата типа ГПА-Ц-25 ($\eta_{ex}^{тка}$) при различной массовой производительности.

строительной промышленности, а вспомогательное оборудование всего ГТП изготавливается, как правило, предприятием, поставляющим ТКА. В связи с этим интегрально эффективность ГТП оценивается в составе ТКА с использованием η_{ex}^{TKA} .

По методике, изложенной в работе [12], производился эксергетический анализ эффективности ТКА газовой промышленности типа ГПА-Ц-25, результаты которого представлены на рис. 3. Системной характеристикой агрегата является зависимость $\eta_{ex}^{TKA} = f(G_T)$. Форма системной характеристики агрегата определяется газодинамической характеристикой ЦК в виде зависимости $\eta_{ад}^{цк} = f(G_T)$, а положение оптимума режима работы агрегата и двигателя зависит как от характера ее изменения, так и влияния величины КПД ГТП. В работе [11] и других исследованиях было установлено, что преимущественное влияние на величину η_{ex}^{TKA} оказывает эффективность привода. В связи с этим можно сделать вывод о том, что точка $(\eta_{ex}^{TKA})_{max} = 0,315$ и соответствует оп-

тимальному значению η_e привода, созданному на основе ГТД НК-36СТ. Этот режим работы ГТП может быть реализован при массовой производительности агрегата 425 кг/с, что соответствует предельному значению мощности привода. Это означает, что при создании ТКА под существующий ГТП проточную часть ЦК следует проектировать на производительность, обеспечивающую достижение оптимального режима работы ТКА при реальном значении мощности ГТП в заданном интервале температур окружающей среды.

Производился также эксергетический анализ режимов работы агрегата типа ГПА-Ц-6,3А, созданного на основе ГТД Д-336-2 конструкции ЗМКБ “Ивченко-Прогресс” и ЦК НЦ-6,3/56-1,45 конструкции ОАО “Сумское НПО им. М.В. Фрунзе”, с использованием характеристик ГТП и ЦК, полученных в процессе натурных испытаний. Результаты в виде графических зависимостей $\eta_{ex}^{цк}$, $\eta_{ex}^{ГТП}$, $\eta_{ex}^{TKA} = f(G_T)$ представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, при расчетной производительности ЦК, равной 93,5 кг/с, что соответствует режиму работы с $(\eta_{ex}^{цк})_{max}$, величина $\eta_{ex}^{ГТП}$ составляет 0,29...0,295. Анализ системной зависимости $\eta_{ex}^{ГТП} = f(G_T)$ для агрегата типа ГПА-Ц-6,3А показывает, что несмотря на пологий характер кривой $\eta_{ex}^{TKA} = f(G_T)$, влияние КПД привода на изменение η_{ex}^{TKA} весьма существенно. Это проявляется в том, что величина $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$ достигает значения 0,25 вместо 0,245 для номинального режима работы ЦК. При этом режиме производительность компрессора увеличивается на 11 % относительных, а расход т.г. в двигателе Д-336-2 увеличивается с 0,42 кг/с до 0,434 кг/с, т.е. на 3,3 % относительных. Однако удельный расход ТГ в ГТП уменьшается пропорционально увеличению мощности привода*.

Выше отмечалось, что системная характеристика агрегата, определяется видом газодинамической характеристики компрессора $\eta_{ад}^{цк} = f(G_T)$, т.е. особенностями геометрии проточной части ЦК. В случае пологий характеристики, что свойственно ступеням ЦК с безлопаточным диффузором, даже незначительный рост $\eta_e^{ГТП}$ при уве-

* Данные о характеристиках ГТП с двигателем Д-336-2 при изменении режимов его работы предоставлены ЗМКБ “Ивченко-Прогресс”.

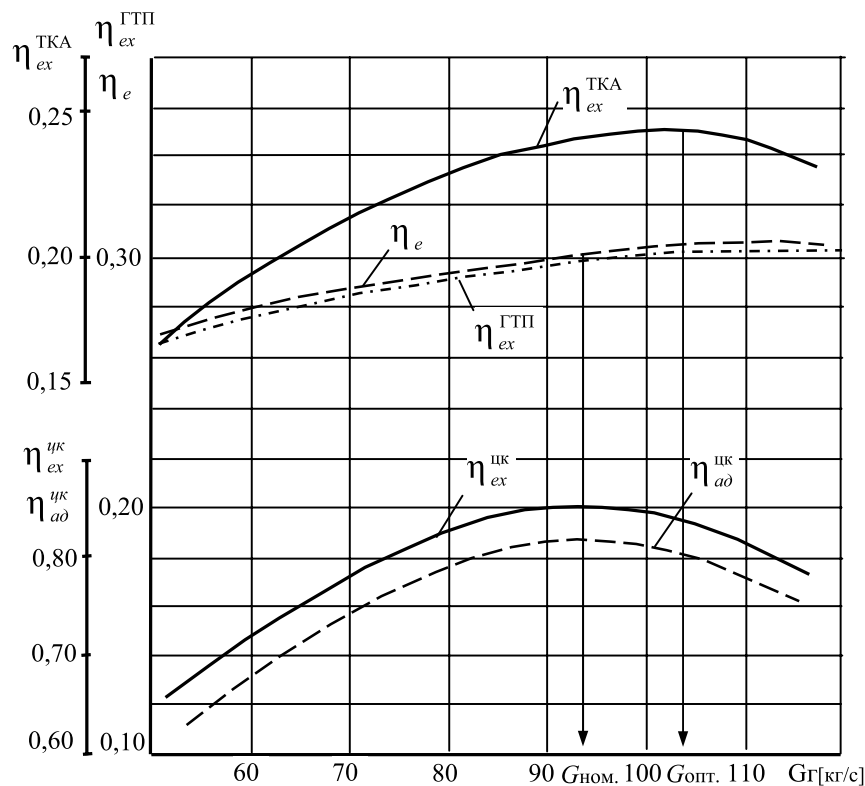


Рис. 4. Зависимость эксергетических характеристик газотурбинного привода и компрессора, системной характеристики агрегата ГПА-Ц-6,3/56-1,45 от массовой производительности.

личении G_T , т.е. мощности СТ, обеспечивает существенный сдвиг вправо положения точки, соответствующей режиму $(\eta_{ex}^{TCA})_{max}$. Такое влияние η_{ex}^{GTP} на положение точки оптимума системной характеристики агрегата обусловлено, как это было показано ранее [11], преимущественным воздействием привода на термодинамическую эффективность ТКА. Таким образом, результаты настоящей работы позволяют сделать вывод о том, что системный анализ ГТП в составе ТКА позволяет установить его оптимальный режим. При этом оптимальным режимом работы ГТП следует считать такой режим, при котором достигается максимальное значение η_{ex}^{TCA} и, соответственно, минимальный расход топлива. При таком подходе к выбору режима работы должно обеспечиваться наиболее эффективное преобразование химической эксергии ТГ, подводимого к ГТП, в термомеханическую эксергию газового потока, направляемого из ЦК ТКА в магистральный газопровод. С целью обоснования этого положения применительно к агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 выполнен анализ зависимости

относительного расхода ТГ от безразмерных коэффициентов его массовой производительности, соответствующих расчетному и оптимальному режимам. При этом под относительным расходом ТГ в агрегате подразумевается отношение массового расхода ТГ в ГТП в единицу времени к массовой производительности ЦК за то же время, т.е. $\bar{G} = \frac{G_{TГ}}{G_T}$. Под безразмерным коэффициентом

массовой производительности подразумевается отношение текущего значения массовой производительности ЦК к его производительности на расчетном (номинальном) ($K_G^{ном} = G_T / G_T^{ном}$) и оптимальном режимах ($K_G^{opt} = G_T / G_T^{opt}$). Результаты расчетного анализа эффективности по относительному расходу ТГ ГТП, созданного на основе двигателя Д-336-2, показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, несмотря на увеличение расхода ТГ на режимах, соответствующих $(\eta_{ex}^{TCA})_{max}$, относительный расход ТГ при работе агрегата на оптимальных режимах снижается.

Полученные данные однозначно не распространяются на возможные показатели КС, ком-

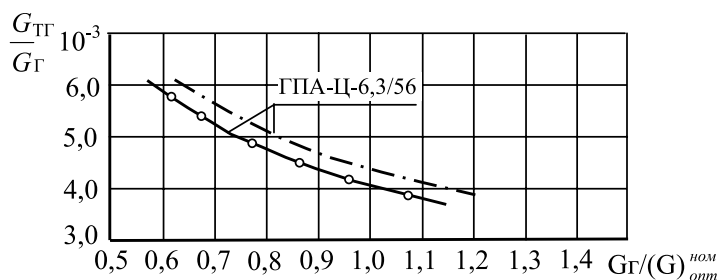


Рис. 5. Зависимость относительного расхода топливного газа от коэффициента массовой производительности агрегата при номинальном (—○—) и оптимальном (---) режимах работы ГПА.

плектуемой агрегатами соответствующей мощности, т.к. оптимизация ее параметров является самостоятельной задачей, при решении которой учитываются и другие факторы, а не только режимы работы отдельных агрегатов в составе КС.

Следует отметить, что реализация предложенного метода определения оптимального режима работы ГТП и ТКА требует изменения подходов к проектированию проточной части ЦК, а также выбору мощности ГТП. В частности, при создании ПЧ компрессоров предпочтение следует отдавать использованию безлопаточных диффузоров в ступенях ЦК, обеспечивающих более пологую газодинамическую характеристику, а ГТП должен иметь большой запас мощности по сравнению с величинами, предусматриваемыми в настоящее время типовыми техническими требованиями на создание ТКА. Возникает также вопрос о применимости результатов эксергетического анализа для практических целей в процессе создания ТКА с ГТП. В связи с этим следует иметь в виду следующие аспекты:

1) Оценку эффективности двигателя, как основного элемента ГТП, на стадии его проектирования, испытаний и доводки.

2) Оценку эффективности ГТП в составе ТКА, как важнейшего элемента ТКУ и, соответственно, КС газотранспортной системы.

В первом случае нет необходимости усложнять существующую методологию оценки эффективности ГТД, так как с использованием величины эффективного КПД оценивается его эффективность как тепловой машины. В этом случае разработчик ГТД стремится к обеспечению $(\eta_e)_{\text{max}}$. В

то же время к недостаткам этого критерия при работе ГТП в составе ТКА следует отнести то, что он не отражает прямым образом влияния режимов работы ЦК и, следовательно, газопровода на эффективность ГТП. Это связано с тем, что эффективный КПД для ГТД, так же как и $\eta_{\text{п}}$ или $\eta_{\text{ад}}$ для ЦК, является частным показателем, который не соответствует требованиям системного анализа КС (газотранспортной системы). Применяемый для оценки эффективности ГТП такой показатель как "эффективный КПД в стационарных условиях" отражает влияние ряда систем ГТП (гидравлические потери в ВПС и ВС, подогрев ЦВ на входе и др.) на его эффективность, но также, как и η_e на муфте ГТД, не учитывает специфичность ЦК как нагрузки с переменной характеристикой, определяемой режимом работы газопровода.

Выводы

1. Эксергетический анализ работы газотурбинного привода в составе турбокомпрессорного агрегата на основе системного подхода позволяет выявить интегративные свойства анализируемой системы, заключающиеся в том, что его системная характеристика имеет оптимум по величине эксергетического КПД агрегата.

2. Максимальному значению эксергетического КПД агрегата соответствует эффективный КПД привода, обеспечивающий максимальную термодинамическую эффективность анализируемой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коздоба Л.А. Системный подход в теплотехнике и теплофизике // Промышленная теплотехника. — 1997. — Т.19, № 4-5 — С. 137–144.

2. Парафейник В.П. Научные основы проектирования блочнокомплектных турбокомпрессорных агрегатов и установок с газотурбинным приводом // Зб. наукових праць "Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання". — Т.1. — Харків: ІПМаш НАНУ. — 2003. — С. 36–46.

3. Эльснер Н., Фраштер В. Составление эксергетического баланса газотурбинной установки // Вопросы термодинамического анализа (эк-

сергетический метод). — М.: Мир, 1965. — С. 122–138.

4. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. — М.: Энергия, 1968. — 280 с.

5. Марченко А.П., Марченко Н.А. Особенности энергетического анализа рабочего процесса ГТУ//Вісник двигунобудування. — 2005. — № 2. — С. 25–31.

6. Парафейник В.П. Термодинамическая эффективность турбокомпрессорных установок газовой и нефтяной промышленности // Компрессорная техника и пневматика. — 1996. — Выпуск 1–2 (10–12). — С. 44–54.

7. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Расчет химической энергии и эксергии технических топлив // Известия РАН. — Энергетика. — 1994. — № 1. — С. 106–115.

8. Костенко Г.Н. Эксергетический анализ тепловых процессов и установок (теоретические основы вопроса). — Одесса: Политехнический институт, 1964. — 32 с.

9. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. — М.: Мир, 1977. — 518 с.

10. Бродянский В.М., Сорин М.В. Принципы определения КПД технических систем преобразования энергии и вещества// Энергетика: Известия ВУЗ'ов. — 1985. — №1. — С. 60–65.

11. Газотурбинный двигатель НК-36СТ. Технический проект. — Самара: КМЗ. — 1988. — Т.1. — 142 с.

12. Парафейник В.П., Евенко В.И. Термодинамическая эффективность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом// Промышленная теплотехника. — 2000. — Т.22, № 1. — С. 30–36.

Получено 03.10.2005 г.