

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНОГО ЦИКЛА НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Иванов В.А., Иноземцев А.А.
ОАО "АВИАДВИГАТЕЛЬ", г. Пермь

Энергетические ГТУ сложного цикла с двухступенчатым отводом и подводом тепла (с промежуточным охлаждением и подогревом) могут быть созданы на базе авиационных ГТД, в частности ТРДД с высокой и сверхвысокой степенью двухконтурности, которые по конструкции компрессора разделяются на:

1) двигатели с одноступенчатым вентилятором и двухкаскадным компрессором, состоящим из каскадов (компрессоров) низкого и высокого давления средней напорности (двигатели НК-44, НК-93);

2) двигатели с одноступенчатым вентилятором и подпорными ступенями после вентилятора, образующими низконапорный каскад низкого давления (КНД), и многоступенчатым высоконапорным компрессором (двигатель ПС-90А), который условно может быть разделен на каскады среднего (КСД) и высокого (КВД) давления и в результате получен двигатель с трехкаскадным компрессором.

Известен, например, газотурбинный двигатель НК-37 для привода электрогенератора с трехкаскадным компрессором, состоящим из КНД, КСД и КВД. Известна отечественная энергетическая ГТУ сложного цикла ГТ-100 [1] с двухкаскадным компрессором, состоящим из КНД средней напорности, после которого расположен воздухоохладитель (ВО), и КВД средней напорности, после турбины которого (ТВД) расположена вторая камера сгорания (КС2).

Эффективный КПД ГТУ сложного цикла с двухкаскадным компрессором (типа ГТ-100) является функцией одного параметра - степени сжатия в КНД, от которой зависит также степень сжатия в КВД (и расширения в ТВД) при сохранении общей степени сжатия в компрессоре, а, следовательно, зависит количество тепла, отведенного в ВО (при выдерживании постоянной температуры воздуха после ВО, близкой к атмосферной) и подведенного в КС2 (при условии равенства температур газа за КС1 и КС2).

Эффективный КПД ГТУ сложного цикла с трехкаскадным компрессором (типа НК-37) и указанным расположением ВО и КС2 при сохранении общей степени сжатия в компрессоре является функцией двух параметров - степени сжатия в КНД и степени сжатия в КВД,

от которых соответственно зависит количество тепла, отведенного в

ВО и подведенного в КС2. В работе [2] теоретически показано существование в ГТУ с двухступенчатым отводом и подводом тепла максимума эффективного КПД при оптимальной степени сжатия и расширения в первой ступени (применительно к настоящей работе степени сжатия в КНД и степени расширения в ТВД), которые могут быть реализованы в ГТУ с трехкаскадным компрессором.

На рис.1 показаны схемы сравниваемых ГТУ сложного цикла, которые могут быть спроектированы на базе авиационных ГТД. В качестве топлива в ГТУ используется природный газ метан.

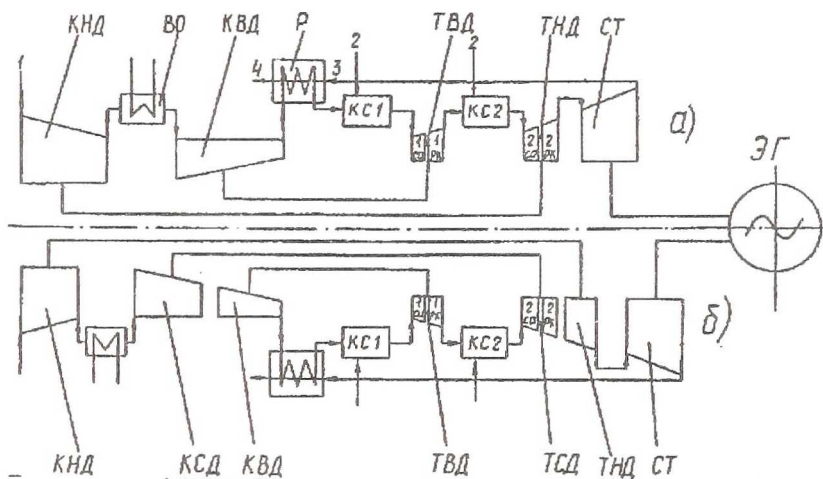


Рисунок 1- Схемы ГТУ сложного цикла с двух (а)- и трехкаскадным (б) компрессором и регенератором: 1 - атмосферный воздух; 2 - топливо; 3 - отработавшие в турбине газы; 4 - уходящие газы.

На рис.2 показана установленная путем параметрических расчетов зависимость параметров сравниваемых ГТУ сложного цикла без регенератора и с регенератором от степени сжатия в КНД и степени сжатия в КВД, определяющих экономичность ГТУ. Там же указаны принятые потери энергии в узлах и отборы воздуха из-за компрессора (на охлаждение ТВД) и из его середины (на охлаждение ТСД, ТНД, СТ), отнесенные к расходу воздуха через компрессор.

Вначале рассмотрим влияние отвода тепла в ВО (при понижении температуры воздуха после ВО до 303К путем охлаждения водой) и подвода тепла в КС2 (при условии $T^*_{r1}=T^*_{r2}=1550\text{K}$) на экономичность ГТУ сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором без регенератора.

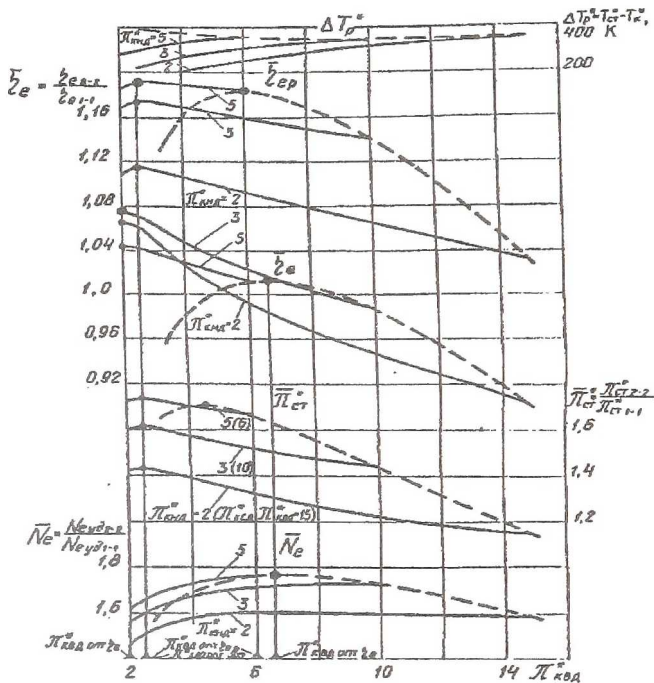


Рисунок 2 - Зависимость параметров ГТУ сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором от степени сжатия в КНД и КВД при экономической общей степени сжатия ($ISO, T_{г1}^* = T_{г2}^* = 1550K; \pi_{к\sum опт}^* \eta_e = 30; \eta_{к\sum}^* = 0,89; \eta_{твд}^* = \eta_{тсд}^* = \eta_{тнд}^* = 0,87; \eta_{ст}^* = 0,94; \eta_{г1} = \eta_{г2} = 0,9995; \sigma_{вх.у}^* = 0,99; \sigma_{кан}^* = 0,97; \sigma_{во}^* = 0,955; \sigma_{кc1}^* = 0,955; \sigma_{кc2}^* = 0,97; \pi_{вх.у}^* = 1,044; \eta_{пер} = 0,85; \sigma_{пер\sum}^* = 0,91; \overline{G}_{ок.1са} = 0,08; \overline{G}_{ок.1рк} = 0,045; \overline{G}_{ок.2са} = 0,08; \overline{G}_{ок.2рк} = 0,035; \overline{G}_{ок.ост.са,рк} = 0,055$):

- ГТУ с двухкаскадным компрессором;
- ГТУ с трехкаскадным компрессором;
- - максимумы параметров.

Как видно из рис.2, эффективный КПД η_e ГТУ с трехкаскадным компрессором при уменьшении степени сжатия в КВД (уменьшении подвода тепла в КС2) увеличивается и достигает максимума при $\pi_{квд опт}^* \eta_e = 2$, так как при этом увеличивается и достигает максимума (при $\pi_{квд опт}^* \pi_{ст}^* = 2,5$) степень расширения $\pi_{ст}^*$ в свободной силовой турбине (СТ), что повышает экономичность. Максимум $\pi_{ст}^*$ в работе [3] предложено считать практическим критерием эффективности использования тепла, подведенного в КС2.

Эффективный КПД ГТУ с трехкаскадным компрессором увеличивается также при увеличении степени сжатия в КНД (увеличении отвода тепла в ВО) и достигает максимума при степени сжатия в КНД $\pi_{\text{кнд опт } \eta_e}^* = 3$, соответствующей низкой напорности. Как видно из рис.3, указанная величина $\pi_{\text{кнд опт } \eta_e}^*$ является оптимальной по экономичности для ГТУ с ВО (без КС2) с двух- и трехкаскадным компрессором и ее необходимо выдерживать для достижения максимума эффективного КПД в ГТУ сложного цикла (с ВО и КС2).

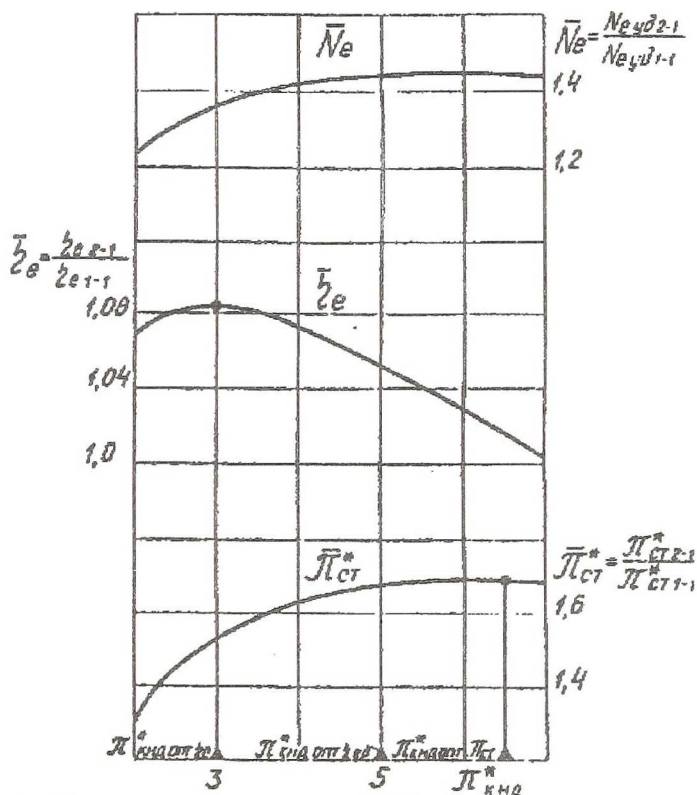


Рисунок 3 - Зависимость параметров ГТУ с ВО (без КС2) с двух- и трехкаскадным компрессором от степени сжатия в КНД при экономической общей степени сжатия ($\eta_{\text{тк } \Sigma}^* = 0,89$; $\eta_{\text{г2}} = 1$; $\sigma_{\text{кс2}}^* = 1$; $\bar{G}_{\text{ох. 2са}} = 0,015$; $\bar{G}_{\text{ох. 2рк}} = 0,012$; $\bar{G}_{\text{ох. ост}} = 0,035$; остальные условия и коэффициенты указаны на рис.2): - максимумы.

Как видно из рис.2, эффективный КПД ГТУ с двухкаскадным компрессором при уменьшении степени сжатия в КВД также увеличивается и

достигает максимума при $\pi_{\text{квд опт } \eta_c}^* = 6,5$, когда степень сжатия в КНД становится больше оптимальной по экономичности ($\pi_{\text{кнд}}^* = 4,6$), так как при этом увеличивается степень расширения в СТ.

Максимум эффективного КПД ГТУ с трехкаскадным компрессором ($\eta_{\text{с макс}} = 1,076$) заметно выше (на 6%), чем в ГТУ с двухкаскадным компрессором ($\eta_{\text{с макс}} = 1,013$), так как в ГТУ с трехкаскадным компрессором при сохранении оптимальной по экономичности степени сжатия в КНД имеется возможность независимо уменьшать степень сжатия в КВД (и увеличивать степень расширения в СТ) до оптимальной по экономичности величины.

Заметим, что при увеличении степени сжатия в КВД (и уменьшении ее в КСД до $\pi_{\text{кнд}}^* = 1$ в пределе) ГТУ с трехкаскадным компрессором превращается в ГТУ с двухкаскадным компрессором с совпадением параметров на рис.2, что делает наглядным сравнение экономичности упомянутых ГТУ.

Затем сравним экономичность ГТУ сложного цикла с регенератором тепла отработавших в турбине газов. В работе [2] теоретически показано, что в ГТУ с двухступенчатым отводом и подводом тепла оптимальные по эффективному КПД степени сжатия и расширения в первой ступени (соответствующие $\pi_{\text{кнд}}^*$ и $\pi_{\text{твд}}^*$) увеличиваются с увеличением степени регенерации $\eta_{\text{рег}} = (T_{\text{р}}^* - T_{\text{к}}^*) / (T_{\text{ст}}^* - T_{\text{к}}^*)$. Параметрические расчеты дают аналогичные результаты.

Как видно из рис.2 в сравниваемых ГТУ с двух- и трехкаскадным компрессором и регенератором при увеличении степени регенерации до $\eta_{\text{рег}} = 0,85$ оптимальная по эффективному КПД $\eta_{\text{ср}}$ степень сжатия в КНД увеличивается до $\pi_{\text{кнд опт } \eta_{\text{ср}}}^* = 5$ (и становится больше оптимальной по экономичности без регенератора $\pi_{\text{кнд опт } \eta_{\text{с}}}^*$ на рис.3), так как при этом увеличивается степень расширения в СТ и (с учетом охлаждения воздуха в ВО после КНД) разность температур $\Delta T_{\text{р}}^* = T_{\text{ст}}^* - T_{\text{к}}^*$ за силовой турбиной и компрессором, характеризующая предельно возможное количество регенерируемого тепла. При увеличении степени регенерации до $\eta_{\text{рег}} = 1$ степень сжатия в КНД, оптимальная по $\eta_{\text{ср}}$, приближается к оптимальной по $\pi_{\text{ст}}^*$ ($\pi_{\text{кнд опт } \eta_{\text{ст}}}^* = 6,5$ на рис.3).

Видно также, что в ГТУ с двухкаскадным компрессором оптимальная по эффективному КПД степень сжатия в КВД уменьшается до $\pi_{\text{квд опт } \eta_{\text{ср}}}^* = 6$ (соответственно $\pi_{\text{кнд опт } \eta_{\text{ср}}}^* = 5$), а в ГТУ с трехкаскадным компрессором - увеличивается и становится равной оптимальной по степени расширения в СТ ($\pi_{\text{квд опт } \eta_{\text{ср}}}^* = \pi_{\text{квд опт } \eta_{\text{ст}}}^*$), так как при этом также увеличивается разность температур $\Delta T_{\text{р}}$.

Максимум эффективного КПД ГТУ с трехкаскадным компрессором ($\bar{\eta}_{\text{ср max}}=1,19$) практически равен максимуму эффективного КПД ГТУ с двухкаскадным компрессором ($\eta_{\text{ср max}}=1,185$), так как эти максимумы достигаются при одинаковой степени сжатия в КНД, оптимальной по $\eta_{\text{ср}}$, и так как в ГТУ с трехкаскадным компрессором с уменьшением степени сжатия в КВД увеличивается $\pi_{\text{ср}}^*$, но уменьшается $\Delta T_{\text{р}}^*$, вследствие чего зависимость $\eta_{\text{ср}}$ от $\pi_{\text{квд}}$ пологая. Тогда в ГТУ с трехкаскадным компрессором и регенератором без заметного уменьшения эффективного КПД можно, сохраняя $\pi_{\text{кнд опт}}^* \eta_{\text{ср}}$, увеличивать степень сжатия в КВД (и уменьшать ее в КСД) больше оптимальной по степени расширения в СТ величины и соответственно увеличивать удельную мощность $N_{\text{е уд}}$ (отнесенную к расходу воздуха через компрессор). В пределе (при $\pi_{\text{ксд}}^*=1$) получим ГТУ с двухкаскадным компрессором с максимальной удельной мощностью.

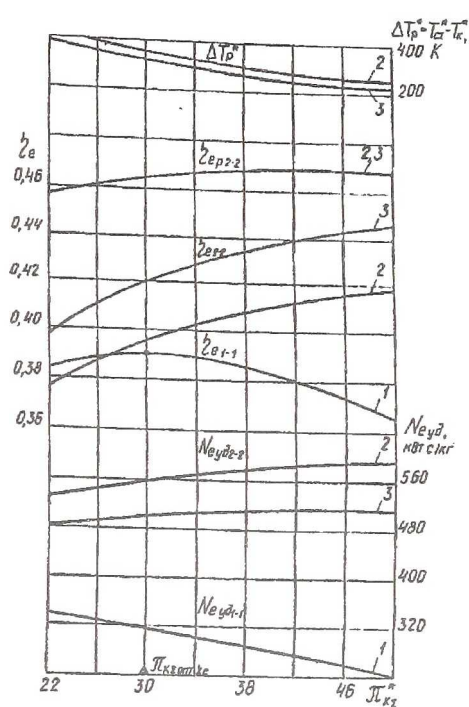
Согласно изложенному максимум эффективного КПД ГТУ сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором и регенератором достигается при одинаковой степени сжатия в КНД, которая с увеличением степени регенерации увеличивается и приближается к оптимальной по степени расширения в СТ. В ГТУ с трехкаскадным компрессором для достижения наибольшей экономичности необходимо дополнительно иметь степень сжатия в КВД, близкую к оптимальной по степени расширения в СТ.

Как видно из рис. 4, эффективный КПД ГТУ сложного цикла $\eta_{\text{е 2-2}}$ с двухкаскадным компрессором без регенератора увеличивается с увеличением общей степени сжатия $\pi_{\text{к}\Sigma}^* = \pi_{\text{кнд}}^* \pi_{\text{квд}}^*$ и становится больше эффективного КПД ГТУ простого цикла $\eta_{\text{е 1-1}}$ при степени сжатия близкой к оптимальной по экономичности (экономической). При меньшей степени сжатия увеличение эффективного КПД за счет отвода тепла в ВО и подвода тепла в КС2, возрастающее с увеличением общей степени сжатия [2], недостаточно для компенсации дополнительных потерь энергии, связанных с введением в конструкцию ГТУ ВО и КС2.

Эффективный КПД ГТУ сложного цикла с трехкаскадным компрессором без регенератора также увеличивается с увеличением общей степени сжатия $\pi_{\text{к}\Sigma}^* = \pi_{\text{кнд}}^* \pi_{\text{ксд}}^* \pi_{\text{квд}}^*$, но при этом остается выше эффективного КПД ГТУ с двухкаскадным компрессором в результате оптимизации экономичности, показанной на рис.2. Видно также, что с увеличением общей степени сжатия удельная мощность ГТУ простого цикла $N_{\text{е уд 1-1}}$ уменьшается, а удельная мощность $N_{\text{е уд 2-2}}$ сравниваемых ГТУ сложного цикла без регенератора увеличивается.

Эффективный КПД $\eta_{\text{е р 2-2}}$ сравниваемых ГТУ сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором и регенератором с увеличением общей степени сжатия слабо растет вследствие уменьшения разности и температур $\Delta T_{\text{р}}$.

Рисунок 4 - Зависимость параметров ГТУ простого и сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором, оптимизированных по экономичности, от общей степени сжатия (условия и коэффициенты указаны на рис.2): 1 - ГТУ простого цикла; 2 - ГТУ сложного цикла с двухкаскадным компрессором; 3 - ГТУ сложного цикла с трехкаскадным компрессором;



газов обеспечивает небольшое повышение экономичности и становится малоэффективной.

Заметим, что в ГТУ с трехкаскадным компрессором можно объединить турбокомпрессоры среднего и высокого давления и получить двухкаскадный ГТУ с низконапорным КНД, после которого расположен ВО, и высоконапорным КВД, между ступенями турбины которого расположена КС2. Тогда согласно изложенному в статье наибольшая экономичность может быть достигнута в ГТУ сложного цикла с двух- и трехкаскадным компрессором, содержащим низконапорный КНД с оптимальной по экономичности степенью сжатия.

Список литературы

1. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат. 1985.304с.
2. Кириллов И.И. Газовые турбины и газотурбинные у станов-ки.т.2. Газотурбинные установки. М.: Машгиз. 1956. 318с.
3. Иванов В.А. Сравнение удельных параметров обычных и двух- камерных ТВВД// Авиационная промышленность. 1991. № 4.с. 14-16.