

УДК 629.7.036.3.001

В.А. КОВАЛЬ, канд. техн. наук,
 Л.И. МАРТЫНЕНКО, канд. техн. наук,
 Г.В. ПАВЛЕНКО, канд. техн. наук,
 В.А. СЕДРИСТЫЙ
 И.Ю. СТЕПАНОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ Д-18Э-25
 ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРСИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ
 ГТУ/ПГУ

Быстрое развитие и совершенствование методов расчета и конструирования основных элементов ГТУ с использованием современной вычислительной техники и САПР потребовало моделирование рабочих процессов установок, особенно приводных ГТД.

Газотурбинная установка Д-18Э-25, создаваемая на базе авиационного ТРДД Д-18Т, может быть использована в передвижных или стационарных автономных энергетических установках, работающих на жидком или газообразном топливе, а также в составе парогазовых энергетических блоков с высоким уровнем утилизации тепла.

Номинальная мощность на валу свободной турбины ГТУ равна 25 МВт при параметрах рабочего процесса $T_r^* = 1425 \text{ К}$, $\pi_r^* = 17,5$, $G_s = 85,5 \text{ кг/с}$. Однако в процессе эксплуатации энергетической установки возникает потребность в кратковременном или долговременном увеличении ее мощности. Это достигается либо форсированием приводного ГТД, либо работой ГТУ в системе ПГУ с теплоутилизационным контуром одного (двух) давлений (ТУК-1, ТУК-2).

В настоящей работе рассматривается модель ГТД, относящаяся к первому уровню моделирования, при котором характеристики узлов турбокомпрессора представляются нулевым уровнем моделирования.

Расчетная схема приводного ГТД, выполненного по трехвальной схеме, показана на рис. I. Основу математической модели составляет набор независимых переменных и определяющая система уравнений нерасчетного режима (система уравнений невязок) /1,2/.

В качестве независимых переменных выбраны величины, определяющие режимы работы узлов турбокомпрессорной группы, основной и дополнительной камер сгорания. Число независимых переменных в математической модели ГТД определяются по соотношению $n = 3z_6 + 3$ для включенных двух камер сгорания и $n = 3z_6 + 2$ при выключенной дополнительной камере сгорания промежуточного подогрева (z_6 - число валов газогенератора). В рассматриваемом случае независимые переменные представлены в следующем наборе:

$$X_{кид}, n_{пркид}, X_{квз}, n_{прквз}, \alpha_{кс}, T_{твд}^*, T_{тнд}^*, \alpha_{ксп}, T_{тс}^*,$$

где $X = \frac{1}{2} \varphi$ - угловая координата на напорной ветви характеристики при $n_{пр} = const$.

Соответственно система уравнений невязок в случае моделирования установившихся режимов будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta f_1 = G_{квз} (1 - \Delta \bar{G}_{пер} - \Delta \bar{G}_{охлтс}) - G_{квз}; \\ \Delta f_2 = G_{квз} (1 - \Delta \bar{G}_{омс} - \Delta \bar{G}_{охлтвз} - \Delta \bar{G}_{охлтнд}) - G_{твз}; \\ \Delta f_3 = G_{квз} (1 - \Delta \bar{G}_{омс} - \Delta \bar{G}_{охлтнд}) - G_{тнд}; \\ \Delta f_4 = G_{квз} (1 - \Delta \bar{G}_{омс}) - G_{тс}; \\ \Delta f_5 = G_{квз} (- G_{твз} L_{твз} \rho_{мвз}); \\ \Delta f_6 = G_{кид} L_{кид} - G_{тнд} L_{тнд} \rho_{кид}; \\ \Delta f_7 = P_c - P_{сронт}; \\ \Delta f_8 = T_{г}^* - T_{г}^*_{задан}; \\ \Delta f_9 = T_{гп}^* - T_{гп}^*_{задан}. \end{array} \right. \quad (I)$$

Первые четыре уравнения представляют собой запись балансов массовых расходов через каскады компрессора и турбины, следующие

два уравнения выражают баланс мощностей на роторах высокого и низкого давлений, седьмое уравнение отражает неизменность геометрии выходного устройства, а последние два уравнения являются записью условий (программы) регулирования двигателя.

В случае, если изменение режима работы газогенератора задается, например, изменением частоты вращения ротора высокого давления, то условие регулирования принимает вид $\Delta f_3 = n_{вг} - n_{вг \text{ задан}}$.

При расчете переходных режимов ГТУ условия балансов мощностей на роторах низкого и высокого давлений не соблюдаются и невязки Δf_5 и Δf_6 записываются в следующем виде:

$$\Delta f_5 = n_{вг} - n_{вг \text{ задан}};$$

$$\Delta f_6 = n_{нг} - n_{нг \text{ задан}}.$$

Значения $n_{вг \text{ задан}}$ и $n_{нг \text{ задан}}$ на каждом временном интервале находятся решением дифференциальных уравнений разгона (торможения) роторов высокого и низкого давлений при заданном изменении температуры газа на выходе из камер сгорания или заданном изменении подачи топлива в камеры сгорания.

При решении системы уравнений (I) основная задача связана с разработкой алгоритма вычисления невязок Δf_i и нормы

$$\omega_0 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2},$$

которая является критерием сходимости (при $\omega_0 \leq \varepsilon$ задача считается решенной). Величины Δy_i соответствуют масштабированным невязкам

$$\Delta y_1 = \frac{\Delta f_1}{G_{вквг}(1 - \sum \Delta G_i)}; \Delta y_5 = \frac{\Delta f_5}{G_{вквг} L_{квг}}; \Delta y_3 = \frac{\Delta f_3}{T_{ГР}^*} \quad \text{и т.д.}$$

Если невязки достаточно малы, то систему нелинейных уравнений

в предположении, что рельеф функции цели $N_0 = f(\vec{x}_i)$ не овражный, а спокойный. В процессе поиска меняется его шаг и, после удовлетворения условия $N_0 \leq \varepsilon_1$, используется модифицированный метод Ньютона. Процесс итераций заканчивается при условии $N_0 \leq \varepsilon_2$.

Математические модели нулевого уровня основных элементов проточной части ГТУ описаны в /2/. При реализации настоящей математической модели ГТУ использована табличная реальная модель КИД и КВД двигателя Д-18Т.

Расчетные исследования возможностей форсирования энергоустановки Д-18Т-25 в составе ГТУ проводились по следующей схеме:

1. Увеличение внешней мощности установки за счет подачи топлива в основную камеру сгорания (дополнительная камера сгорания отсутствует);

2. Увеличение мощности свободной турбины приводного двигателя путем подачи топлива в дополнительную камеру сгорания при условии $G_{\text{поск кс}} = \text{const}$.

В дальнейшем эти варианты форсирования поименованы 1 и 2. При расчете варианта 1 начальная точка соответствует номинальному режиму ГТУ с ее КПД, равном 35%. Начальная точка варианта 2 получена при значениях $\dot{m}_c^* = 17,5$, $T_c^* = 1425$ К, $G_c = 85,5$ кг/с, $T_{\text{гксп}}^* = 1425$ К, т.е. подогрев газа в дополнительной камере сгорания осуществляется до значения температуры основной камеры. Это приводит к увеличению внешней мощности ГТУ до уровня 32,5 МВт. Программа дросселирования установки задается величиной снижения температуры в дополнительной камере сгорания в диапазоне $T_{\text{гксп}}^* = 1425 \dots 1367$ К. Последнее значение примерно соответствует номинальной мощности 25 МВт, вырабатываемой ГТУ при ее штатном исполнении.

Результаты расчетного исследования ГТУ с помощью математической модели представлены на рис. 2. Здесь показано изменение мощности

ГТУ и ее КПД в зависимости от часового расхода топлива

$G_T = G_{\text{топки}} + G_{\text{ткп}}$. Видно, что форсирование энергоустановки за счет промежуточного подогрева газа между турбиной компрессора и свободной турбиной сопровождается значительным падением КПД ГТУ до уровня 28,5% и соответствующим увеличением удельного расхода топлива. Вычисления также показали, что эксплуатация ГТУ-2 на режимах повышенной мощности требует регулирования КПД, поскольку запас его устойчивой работы ΔK_y снижается до 8%. При этом запасы устойчивости КПД достаточно велики и составляют 25...30%.

Указанные обстоятельства делают малопригодным исполнение ГТУ Д-183-25 с дополнительной камерой сгорания с целью форсирования.

Другим способом повышения эффективности энергетической установки является использование бинарного парогазового цикла, т.е. работы ГТУ в составе ПТУ с ТУК-1 или ТУК-2. Утилизация тепла отработанных газов позволяет в ТУК получить перегретый пар (ПП), который расширяясь в паровой турбине вырабатывает дополнительную мощность на ее валу.

Расчетные схемы ТУК-1 или ТУК-2 здесь не приводятся, так как они достаточно подробно описаны в /3,4/. В рамках решения поставленной задачи были разработаны алгоритмы и программы расчета парогазовых ТУК одного и двух давлений и выполнены расчетные исследования работы ГТУ Д-183-25 в системе ПТУ. Поскольку уровень рациональных температур перегретого пара в котлах-утилизаторах

$t_{\text{пп}} = 470...510$ °С /3/ то рассматривается схема ГТУ без промежуточного перегрева газа. При расчете ПТУ режим работы ГТУ - номинальный. Этому режиму соответствуют параметры на выходе из двигателя $T_c^* = 772$ К и $G_r = 87$ кг/с.

В результате расчета ТУК-1 при $P_{пп} = 2,6$ МПа, $P_{квз} = 0,008$ МПа и $t_{пп} = 474$ °С получена суммарная мощность ПГУ, равная 34,1 МВт с КПД 47,6 %. С целью выбора давления перегретого (острого) пара в ТУК-1 была проведена параметрическое исследование влияния величины $P_{пп}$ на суммарную мощность ПГУ и ее КПД. Результаты этого расчета показаны на рис. 3. Видно, что оптимальная величина $P_{пп} = 1...3$ МПа.

Возможности ПГУ с ТУК двух давлений выше. Расчетные исследования показали, что при $P_{ппвз} = 6...10$ МПа и $P_{ппквз} = 0,4...0,8$ МПа мощность энергоустановки увеличивается до уровня 35,8...37,6 МВт, а ее КПД - 48,9...52,4 %. В указанной области значений давления перегретого пара контуров высокого и низкого давлений ТУК-2 характер изменения $\eta_{пгу}$ и КПД - монотонный, т.е. без оптимума.

Таким образом, проведенные с помощью разработанной математической модели исследования ПГУ Д-18Э-25 позволили выявить ее эксплуатационные возможности при различных способах форсирования мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин Л.Н., Швец Л.И., Лапшин А.И. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей. Москва, Труды ЦИАМ, № 832, 1979 г.

2. Павленко Г.В. Математическое моделирование авиационных ГТД при исследовании их эксплуатационных характеристик.: Учебн. пособие.- Харьков: Харьк. авиац. ин-т. 1986, 123 с.

3. Райе. Бинарный цикл газовая турбина с промежуточным подогревом - паровая турбина. Часть I. Тр. американского общества инженеров-механиков. Энергетические машины и установки, № I, 1980, с. 39-42.

4. Боллан. Сравнительная оценка вариантов усовершенствованных комбинированных циклов. Тр. американского общества инженеров-механиков. Современное машиностроение № 8, 1991, с. 74...84.

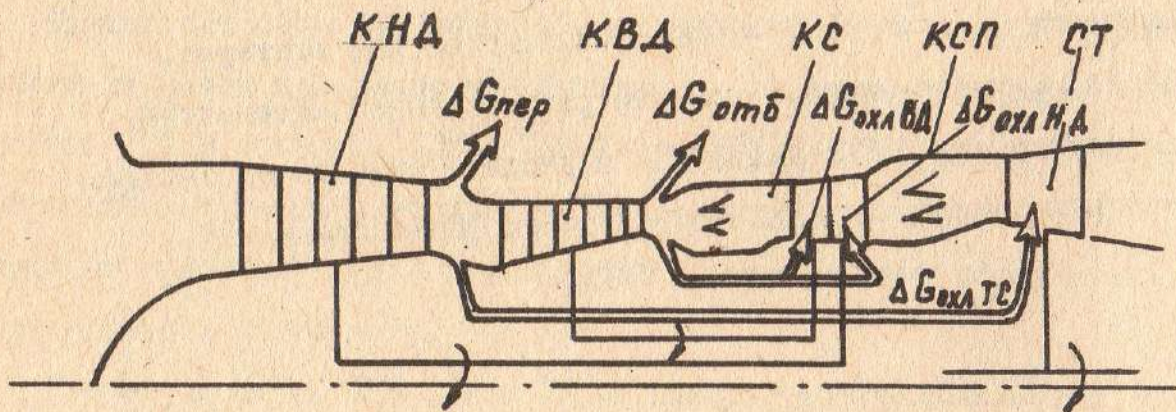


Рис. 1. Расчетная схема приводного ГТД ГТУ

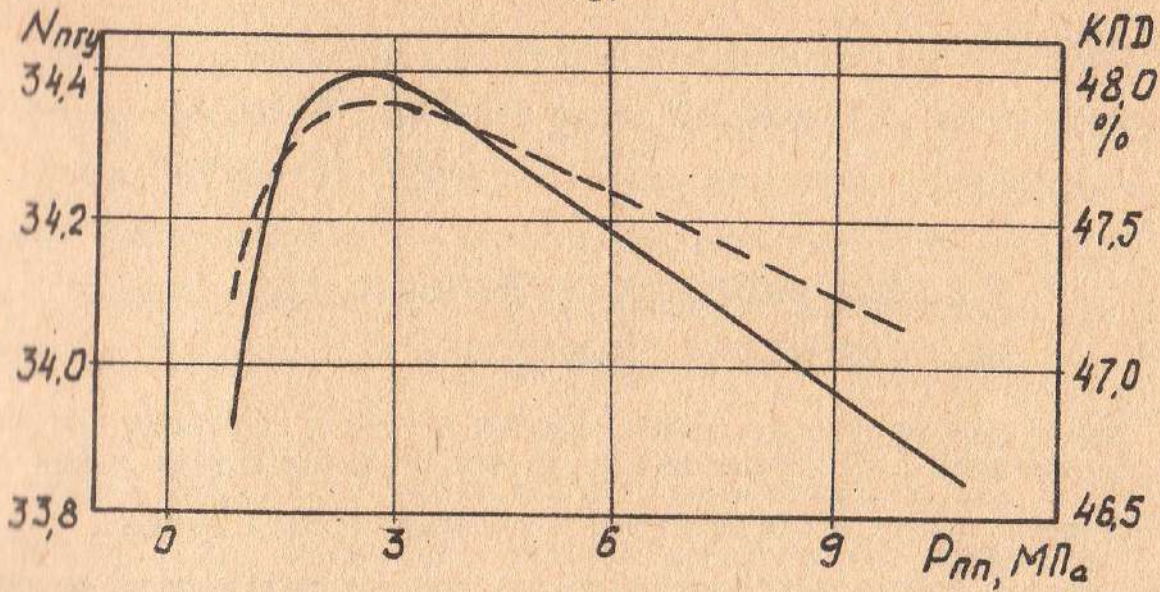


Рис. 2. Характеристики ГТУ при различных способах форсирования мощности

— \triangle — мощность; — \diamond — КПД

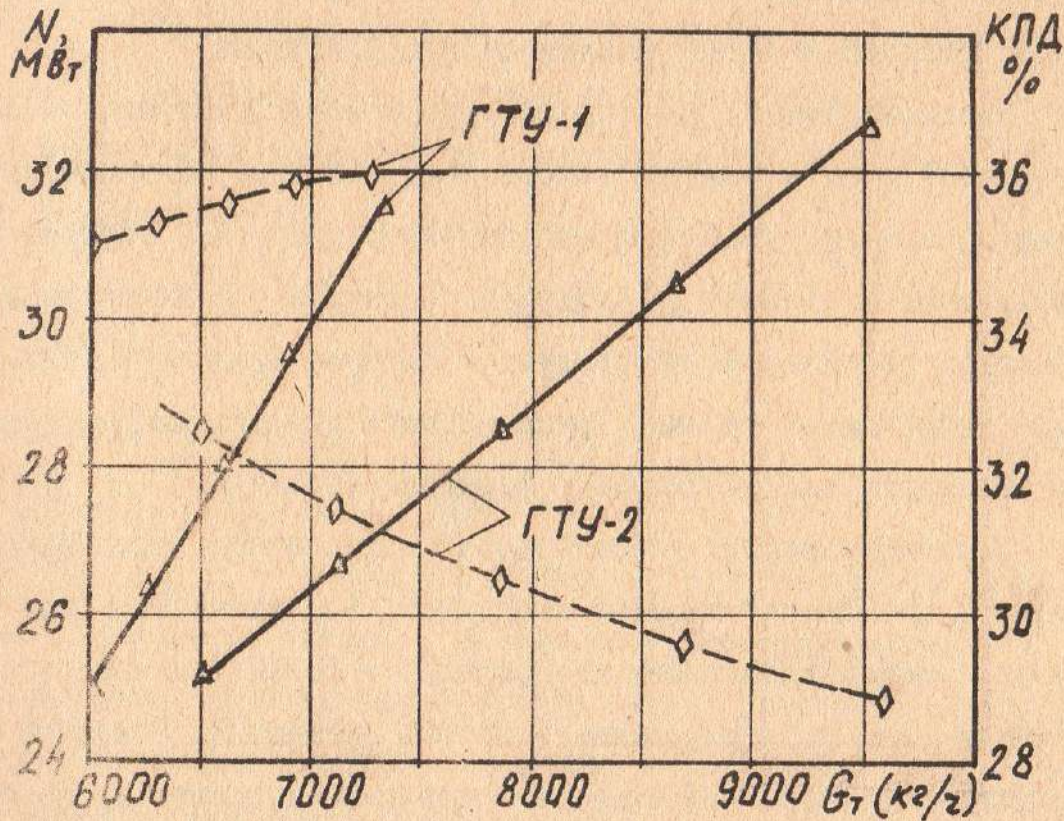


Рис. 3. Влияние давления перегретого пара ТУК одного давления на мощность и КПД

— \triangle — мощность; — \diamond — КПД