

УДК 629.5.064-8438

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭУ СУДНА ТИПА «ИНЖЕНЕР ЕРМОШКИН» НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ

Ермошкин Н. Г., к.т.н., доцент, профессор кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Игнатенко А. А., и.о. начальника кафедры корабельной энергетики и электроэнергетических систем Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: seu@ma.odessa.ua

Лукинова В. В., младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Института Военно-Морских Сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: victoria.lukinova@gmail.com

Опыт эксплуатации и теплотехнические исследования наметили дальнейшие пути проектирования такого типа судовых энергетических установок и их грамотной эксплуатации как на флоте, так и в ВМС.

Ключевые слова: газотурбинная установка, статические характеристики.

Введение. Особенностью ЭУ является комбинированная газопаротурбинная установка. В настоящее время утилизация теплоты отработавших газов в пароводяном контуре является одним из самых эффективных способов повышения экономичности газотурбинных двигателей (ГТД). Комбинированные газопаротурбинные установки (ГПТУ) этого типа, созданные в Украине на производственном объединении «Зоря»-«Машпроект», находят с каждым годом все более широкое применение в различных областях народного хозяйства, таких как ТЭС. В нашей стране, на Николаевском судостроительном заводе и на Николаевском объединении «Зоря»-«Машпроект», впервые в мировой практике судостроения серия судов с горизонтальной грузообработкой типа «Инженер Ермошкин» оснащена ГПТУ, в которой ГТД и паровая турбина (ПТ) теплоутилизационного контура (ТУК) передают полезную мощность на винт через общий редуктор. Аналогичные ГПТУ в дальнейшем устанавливались на боевые корабли ВМФ. Принципиальная схема такой энергетической установки показана на рис. 1.

Основное содержание. Одним из важных показателей работы энергетической установки (ЭУ) являются статические характеристики, которые определяют закономерности изменения параметров на различных установившихся режимах. Их исследованию, методам определения уделяется большое внимание на различных стадиях проектирования, опытно-доводочных работах, эксплуатации.

В качестве метода исследования статических характеристик ГПТУ судна типа «Инженер Ермошкин» был выбран путь построения математической модели ЭУ с проверкой ее адекватности по данным отдельных натурных испытаний и определение особенностей статических характеристик с помощью постановки необходимых численных экспериментов. Такую математическую модель можно записать в векторной форме как:

$$\bar{P} = f(\bar{R}, \bar{G}, \bar{C}, \bar{B}), \quad (1)$$

где \bar{P} – вектор параметров ГПТУ на установившихся режимах (статические характеристики); \bar{R} – вектор параметров, однозначно определяющих режимы работы ГПТУ; \bar{G} – вектор необходимых для расчета геометрических характеристик проточной части; \bar{C} – вектор различных констант; \bar{B} – вектор параметров, определяющих характеристики потребителей полезной мощности.

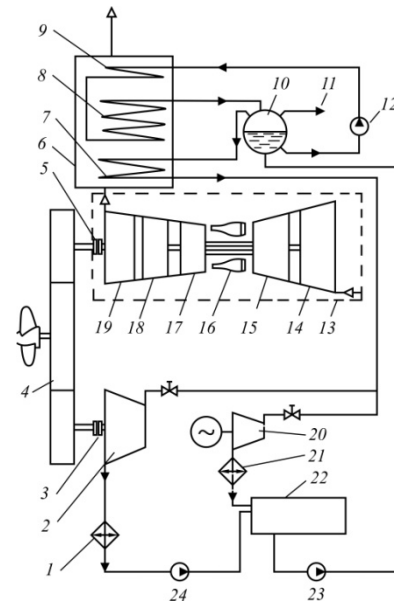


Рисунок 1 – Принципиальная схема ГПТУ судна с горизонтальной грузообработкой типа «Инженер Ермошкин»:

1 – конденсатор пропульсивной ПТ; 2 – ПТ; 3 – разобщительная муфта ПТ; 4 – редуктор; 5 – разобщительная муфта ГТД; 6 – утилизационный котел (УК); 7 – пароперегреватель УК; 8 – испаритель УК; 9 – экономайзер УК; 10 – сепаратор; 11 – отбор насыщенного пара; 12 – циркуляционный насос; 13 – ГТД; 14, 15 – компрессоры низкого и высокого давления соответственно; 16 – камера сгорания; 17, 18 – турбины высокого и низкого давления соответственно; 19 – свободная силовая турбина; 20 – паротурбогенератор; 21 – конденсатор паротурбогенератора; 22 – теплый ящик; 23 – питательный насос; 24 – конденсатный насос

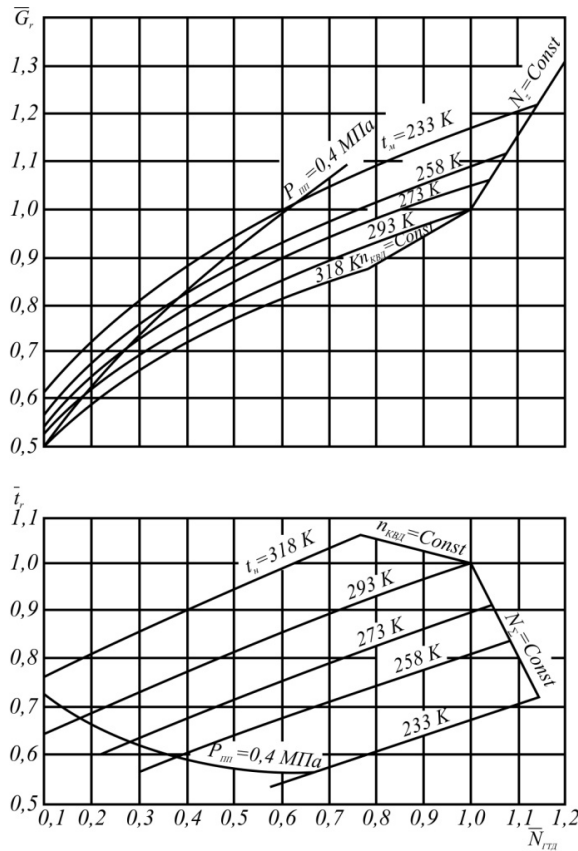


Рисунок 2 – Зависимость изменения относительного расхода газа \bar{G}_r и относительной температуры газа \bar{t}_r от относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных температур наружного воздуха t_n (Параметры отнесены к номинальному режиму)

Не останавливаясь на принципах построения и других особенностях математической модели, в данном случае хотелось бы основное внимание уделить некоторым практически важным результатам исследования статических характеристик.

В ГПТУ судна типа «Инженер Ермошкин» источником энергии для работы ТУК служит теплота отработавших газов ГТД, количество и потенциал которой зависят как от режима работы ГТД, так и параметров наружного воздуха. Как изображено на рис. 2, при постоянной мощности ГТД с изменением температуры наружного воздуха t_n существенно изменяются расход и температура отработавших газов, причем в обратной зависимости. Этим определяется целый ряд особенностей совместной работы ГТД и ТУК на переменных режимах.

Существенное влияние на эксплуатационные возможности ГПТУ оказывают закономерности перераспределения мощности между ГТД и ПТ при изменении режима ГТД и t_n (рис. 3).

При расчетной $t_n = 293$ К на номинальном режиме ГТД мощность ПТ составляет около 23 % от суммарной мощности между ГТД и ПТ остается примерно постоянной (рис. 3).

Если температуры наружного воздуха $t_n < 293$ К, то традиционным для ГТД является закон регулирования $N_{ГТД} = \text{const}$, что обусловлено ограничением по моменту в системе силовая турбина – редуктор винт. Однако при таком законе регулирования с уменьшением t_n падает $N_{ПТ}$ (рис. 3), суммарная мощность ГПТУ и, как следствие, скорость судна. Для обеспечения последней при $t_n < 293$ К потребовалось сохранить суммарную мощность ($N_{\Sigma} = \text{const}$), что связано с форсированием ГТД на величину, компенсирующую падение $N_{ПТ}$. Так, расчетным путем было установлено, что при граничной температуре $t_n < 233$ К, необходимо увеличить $N_{ГТД}$ на 14 % (рис. 4). Соответственно вырос крутящий момент на газотурбинной ветке редуктора, что потребовало специальной проверки на прочность соответствующих узлов. Удельный расход топлива ГПТУ увеличился на 6 % по сравнению с режимом номинальной мощности при $t_n = 293$ К.

Когда агрегат работает в диапазоне температур $t_n = 293...318$ К, статические характеристики являются функцией постоянной частоты вращения контура высокого давления ($n_{КВД} = \text{const}$). При таком законе регулирования на номинальной частоте вращения $n_{КВД}$ и граничной $t_n = 318$ К суммарная мощность агрегата уменьшилась на 18,5 % (рис. 4). В этом случае $N_{ГТД}$ снизилась на 22 %, а $N_{ПТ}$ – всего на 2 %. Незначительное падение $N_{ПТ}$ является следствием высокого потенциала тепла отработавших газов при $t_n = 318$ К (рис. 2), несмотря на падение расхода газа. Объяснить это помогает метод малых отклонений, разработанный для ГПТУ на базе нелинейной математической модели: коэффициент влияния изменения температуры газа перед утилизационным котлом δt_g на мощность ПТ $\delta N_{ПТ}$ примерно в 2 раза сильнее, чем от изменения расхода газа δG_g , т.е.:

$$\delta N_{ПТ} = 1,89\delta t_g + 0,9\delta G_g. \quad (2)$$

Удельный расход топлива увеличился в этом случае на 1,5 % по сравнению с режимом номинальной мощности при $t_n = 293$ К (рис. 4).

Существенное влияние на пропульсивную мощность ГПТУ оказывает подключение паротурбогенератора, работающего на отборе перегретого пара от утилизационного котла (рис. 1). Так, на номинальном режиме ГТД (отбор пара $\Delta G_{ПТ} = 25$ %) пропульсивная мощность ПТ уменьшается на 29 %, а N_{Σ} ГПТУ – на 7 % (рис. 3). Отбор перегретого пара сопровождается падением давления пара в утилизационном котле, увеличением паропроизводительности, незначительным ростом температуры перегретого пара. Как видно из рис. 3, при отборе перегретого пара сокращается диапазон совместной работы ГТД и ТУК на переменных режимах, что связано с падением давления пара на долевых нагрузках ГТД. В этом случае обеспечить

работоспособность паротурбогенератора можно только специальным регулированием генерации пара, в частности, отключением пропульсивной ПТ.

Эксплуатационная надежность ГПТУ с точки зрения коррозионных повреждений низкотемпературных поверхностей утилизационного котла определяется, в основном, температурой наружной стенки трубных пучков экономайзера ($t_{ст}$), которая должна быть ниже точки росы отработавших газов ГТД. Экспериментальные данные показывают, что скорость коррозии резко увеличивается при $t_{ст} < 110^\circ \text{C}$ [3].

На рис. 5 дана расчетная зависимость температуры воды на входе в экономайзер $t_{вх}^{ЭК}$, которую можно условно принять равной $t_{ст}$, от режима работы ГТД в заданном диапазоне изменения t_n . В связи с тем, что экономайзер в принятой тепловой схеме ТУК включен в систему с принудительной циркуляцией, $t_{вх}^{ЭК}$ определяется из условия теплового баланса в сепараторе:

$$t_{вх}^{ЭК} = t' - \frac{t' - t_{пв}}{K_{ц}}, \quad (3)$$

где t' – температура насыщения; $t_{пв}$ – температура питательной воды; $K_{ц}$ – кратность циркуляции.

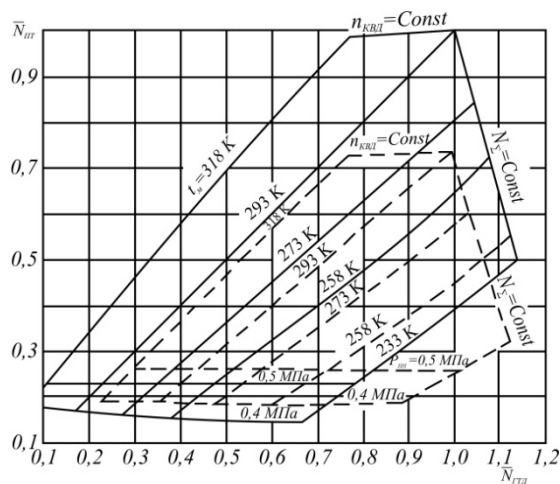


Рисунок 3 – Зависимость относительной мощности паровой турбины $\bar{N}_{ПТ}$ от изменения относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных t_n

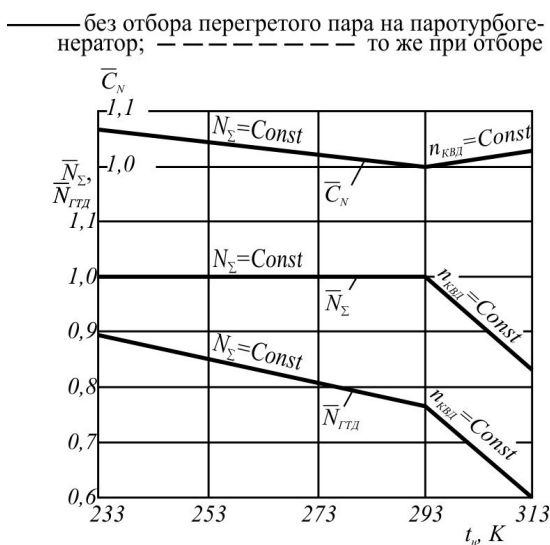


Рисунок 4 – Зависимость относительной суммарной мощности ГПТУ \bar{N}_Σ , относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$, относительного удельного расхода топлива \bar{G}_N для номинального режима от t_n

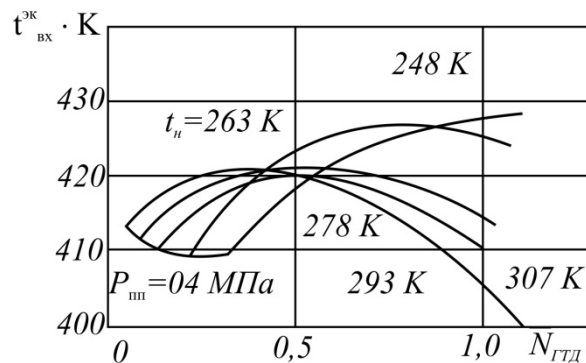


Рисунок 5 – Зависимость температуры воды на входе в экономайзер $t_{вх}^{эк}$ от относительной мощности ГТД $\bar{N}_{ГТД}$ для различных t_n

Характерные перегибы на изолиниях $t_n = \text{const}$ (см. рис. 5) можно объяснить изменением соотношения между падением t' и увеличением $K_{ц}$ с уменьшением нагрузки ГТД.

Как видно из рис. 5, принятое схемное решение ТУК позволяет во всем диапазоне переменных режимов иметь $t_{ст} > 110^\circ \text{C}$, т.е. обеспечить низкие скорости коррозии даже в районе концевых поверхностей утилизационного котла, а также снизить величину $K_{ц}$.

Предварительно проведенный численный эксперимент по уменьшению $K_{ц}$ и его проверка непосредственно в условиях эксплуатации газотурбохода «Инженер Ермошкин» показали, что изменение $K_{ц}$ с 4 до 2 на номинальном режиме ГТД приводит к указанным в таблице результатам.

Таблица 1 – Результаты численного и натурального экспериментов

Параметр	Изменение параметра (при уменьшении кратности циркуляции с $K_{ц} = 4$ до $K_{ц} = 2$)	
	Численный эксперимент	Натурный эксперимент
Паропроизводительность	+5,24	+5,1
Давление перегретого пара	+5,2	+4,8
Температура:		
перегретого пара	-0,3	-0,5
отработавших газов	-1,5	-1,4
воды на входе в экономайзер	-10,3	-9,3
Мощность		
ПТ	+5,2	-
ГПТУ	+1,1	-
Удельный расход топлива	-1,1	-

Замер таких параметров, как расход топлива, мощность ПТ и ГПТУ в условиях эксплуатации не проводился, однако незначительное расхождение расчетных параметров с замеренными (при существенном изменении $K_{ц}$) позволяет считать достоверной оценку такого важного показателя, как удельный расход топлива.

Совместная работа с ПТ начитается с такого минимального режима ГТД, при котором теплота отработавших газов способна создать перегретый пар с определенным давлением ($P_{пт} \approx 0,4-0,5$ МПа), надежно обеспечивающим устойчивую работу эжектора конденсатора и концевых уплотнений ПТ. В связи с этим изобары перегретого пара

$P_{\text{ПП}} = 0,4$ МПа, проведенные по результатам расчета на рис. 2, 3, 5, ограничивают зону переменных режимов ГПТУ, где возможно получение мощности от пропульсивной ПТ.

Полученные результаты проведенного исследования показывают, что метод численного эксперимента на математической модели позволил решить целый ряд качественно новых вопросов работы ГПТУ на переменных режимах. Решение подобных задач экспериментальным путем связано либо с использованием дорогостоящих стендов, либо с длительными исследованиями непосредственно на судне в процессе эксплуатации при наличии трудностей размещения измерительной техники и обработки информации.

Выводы. Исследование статических характеристик в полном объеме позволило определить различные параметрические ограничения работы ГПТУ, смоделировать отдельные аварийные ситуации, получить информацию для расчета динамических и прочностных характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Г. В. Судовая газотурбинная установка / Г. В. Баженов, В. И. Романов, В. Т. Лисов // Морской флот. – 1976. – № 9.
2. Курзон А. Г. Судовые комбинированные энергетические установки / А. Г. Курзон, Б. С. Юдовин – Л. : Судостроение, 1981.
3. Романов В. А. Исследование низкотемпературной коррозии в газотурбинных установках с теплоутилизационным контуром / В. А. Романов. – Судостроение. – 1978. – № 1.

Єрмошкін М. Г., Ігнатенко О. А., Лукінова В. В. ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕУ СУДНА ТИПУ «ІНЖЕНЕР ЄРМОШКІН» НА РІЗНИХ РЕЖИМАХ НАВАНТАЖЕННЯ

Досвід експлуатації та теплотехнічні дослідження намітили подальші шляхи проектування такого типу судових енергетичних установок та їх грамотної експлуатації як на флоті, так і у ВМС.

Ключові слова: газотурбінна установка, статичні характеристики.

Ermoshkin N. G., Ignatenko A. A., Lukinova V. V. OPERATING EXPERIENCE AND THE RESULTS OF THE STUDY OF THE STATIC CHARACTERISTICS OF PP SHIP «ENGINEER ERMOSHKIN» ON VARIOUS MODES OF LOAD

Operating experience and safety research outlined further ways of designing this type of ship power plants and their proper use at fleet and Navy.

Keywords: gas turbine, static characteristics.

© Єрмошкін М. Г., Ігнатенко О. А., Лукінова В. В.

Статтю прийнято
до редакції 12.05.17