

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_04\\_XX](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_04_XX)

EDN: ZLQXBA

УДК 621.438.165-125.

## **Модель оценки параметров паровых турбин для морских газопаротурбинных установок на ранних стадиях проектирования.**

Ю.М. Погодин, А.П. Безухов, Д.А. Лучкин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

### **АННОТАЦИЯ**

При оптимизации параметров морских комбинированных газопаротурбинных установок важно правильно оценивать основные показатели главного оборудования, в том числе паровых турбин. Необходимо иметь простые, но достаточно надежные модели для оценки экономических и массовых показателей оборудования энергетической установки без его детального проектирования.

В данной работе выполнен анализ характерных параметров реализованных и не реализованных проектов морских комбинированных газопаротурбинных установок. Обоснован диапазон изменения основных параметров цикла и оборудования таких установок. Выполнено концептуальное проектирование 144 вариантов паровых турбин с частичной оптимизацией ряда внутренних параметров.

Построена статистическая модель для оценки экономичности и массы однокорпусной паровой турбины активного типа в зависимости параметров цикла паротурбинной части комбинированной газопаротурбинной установки в характерном диапазоне мощностей морских агрегатов. Неопределенность оценки параметров паровой турбины по разработанной модели соответствует уровню концептуального проектирования энергетической установки.

Приведенные примеры расчета параметров энергетической установки демонстрируют необходимость применения достоверных моделей оборудования для обоснованного выбора параметров термодинамического цикла на ранних стадиях проектирования. Использование разработанной модели паровой турбины позволяет уточнять оптимальные значения параметров цикла комбинированной установки.

**Ключевые слова:** комбинированные газопаротурбинные энергетические установки; паровая турбина; показатель эффективности; масса; статистические зависимости; влияние мощности и параметров цикла.

#### **КАК ЦИТИРОВАТЬ:**

Погодин Ю.М., Безухов А.П., Лучкин Д.А. Модель оценки параметров паровых турбин для морских газопаротурбинных установок на ранних стадиях проектирования // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 4. С. XX-XX. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_04\_XX EDN: ZLQXBA

**Рукопись получена:** 12.10.2025

**Рукопись одобрена:** 16.10.2025

**Опубликована online:** 03.11.2025

# Model for predictions steam turbine parameters for marine gas-steam turbine units at early design stages

Yuri M. Pogodin, Andrey P. Bezukhov, Daniil A. Luchkin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

In the process of optimizing the parameters of marine combined gas-steam turbine plants, it is important to correctly evaluate the key performance indicators of the main equipment, including steam turbines. It is necessary to have simple but sufficiently reliable models for assessing the economic and mass performance of power plant equipment without its detailed design.

This paper presents an analysis of the characteristic parameters of implemented and unrealized projects of marine combined gas-steam turbine plants. The range of variation of the main cycle parameters and equipment for such units was substantiated. Conceptual design of 144 steam turbine variants was completed, with partial optimization of several internal parameters.

The statistical model has been constructed to evaluate the efficiency and weight of a single-body active steam turbine depending on the cycle parameters of the steam part a combined gas-steam turbine plant in a typical power range of marine units. The uncertainty of the estimation of the parameters of a steam turbine according to the developed model corresponds to the level of conceptual design of a power plant.

The given examples of calculating the parameters of a power plant demonstrate the need to use reliable equipment models for a justified choice of thermodynamic cycle parameters at the early phases of design. The use of the developed steam turbine model allows for more accurate determination of the optimal values of the combined cycle parameters of the plant.

**Keywords:** combined gas-steam turbine power plants; steam turbine; efficiency; mass; statistical dependencies; influence of power and cycle parameters.

**To cite this article:**

Pogodin YuM, Bezukhov AP, Luchkin DA. Model for predictions steam turbine parameters for marine gas-steam turbine units at early design stages. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025; 4(4):XX-XX.

DOI: 10.52899/24141437\_2025\_04\_XX EDN: ZLQXBA

**Submitted:** 13.10.2025

**Accepted:** 16.10.2025

**Published online:** 03.11.2025

Accepted for publication

## ВВЕДЕНИЕ

Для российского морского энергомашиностроения актуальной задачей является разработка легкого, надежного, экономически эффективного двигателя с мощностями от 5 до 40 МВт. При уровне агрегатной мощности 10 МВт и более двигатель, созданный на основе газотурбинной установки (ГТУ) сложного цикла, может составить конкуренцию по всем основным показателям поршневому двигателю, в том числе для использования на гражданских судах и нефтегазодобывающих комплексах. Для оценки возможных параметров морского двигателя мощностью 10–25 МВт, созданного на базе ГТУ сложного цикла, рационально выполнять концептуальные проектные исследования.

По ряду причин опыт проектирования стационарных газопаротурбинных установок (ГПТУ) не всегда можно использовать для создания морских энергетических установок. Например, работа на морском воздухе, содержащем растворы солей, влияет на выбор материалов и конструкцию проточных устройств турбомашин и теплообменного оборудования. Второе важное обстоятельство — уровень мощностей паротурбинной части, который оказывает влияние на размерность турбомашин (для стационарной энергетики обычно мощность паровой турбины в составе ГПТУ 50 МВт и более, для морских установок она примерно в 10 раз меньше). Поэтому оптимальные параметры цикла для стационарных установок не всегда будут оптимальными для энергетических установок морского назначения.

В процессе начальной стадии проектирования ГПТУ морского применения необходимо достаточно достоверно оценивать вероятные значения параметров основного оборудования паротурбинной части, в частности паровой турбины. Параметры оборудования могут оказывать заметное влияние на внешние характеристики энергетической установки и предопределять выбор ее рациональных параметров, в том числе термодинамических параметров цикла.

Однако на данной стадии проектирования не рационально в процессе

оптимизации параметров термодинамического цикла энергетической установки выполнять достаточно трудоемкую работу по детальному концептуальному проектированию основного оборудования, в частности паровой турбины теплоутилизационного контура (ПТ ТУК). Желательно иметь простую, но обеспечивающую достаточную точность, статистическую модель для оценки экономичности и массы ПТ ТУК. Как отмечалось ранее, используемые в проектировании стационарных установок модели ПТ ТУК (например, [1]) могут давать заметные погрешности в оценке характеристик турбины из-за различной размерности проточных частей. Имеющиеся аналогичные модели для судовых паровых турбин основаны на данных старых проектов пропульсивных агрегатов [2, 3] и могут давать заниженные значения по параметрам экономичности. Кроме того, эти модели учитывают не все влияющие параметры (например, давление в конденсаторе, частоту вращения ротора).

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ И РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ**

Цель — построения формальной математической модели для оценки внешних параметров паровой турбины, работающей в составе ГПТУ, в зависимости от параметров цикла паротурбинной части в характерном диапазоне мощностей морских агрегатов.

Решаемые задачи. Обоснование выбора диапазона изменения внешних варьируемых параметров для модели паровой турбины ТУК комбинированной турбинной энергетической установки морского применения. Выполнение концептуального проектирования паровых турбин с частичной оптимизацией их внутренних параметров для различных сочетаний параметров цикла ТУК. Построение формальной математической модели для оценки внешних параметров (КПД и удельной массы) паровой турбины данного класса.

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ДИАПАЗОНА ВАРЬИРОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОГО КОНТУРА МОРСКИХ ГАЗОПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

В мире существует ограниченное количество реализованных проектов

морских ГТУ с ТУК. Например, известные советские проекты — маршевый двигатель на базе ГПТУ М-21 и всережимный двигатель М-25 (выполнены в «Машпроект»). Наиболее полная информация о реализованных и нереализованных проектах морских ГТУ с ТУК представлена в [4, 5]. В XXI в. такие проекты нам не известны. Поэтому информация, представленная в [4, 5], остается актуальной и в настоящее время. В этих источниках имеются данные по главным и вспомогательным двигателям с ТУК. На основе анализа этих данных определен диапазон изменения термодинамических параметров турбинных ТУК. Сразу следует отметить, что реализованы только морские проекты с одним уровнем давления в утилизирующем парогенераторе (УПГ), что можно объяснить заметным усложнением конструкции оборудования, снижением маневренных качеств и уровня надежности установки с несколькими уровнями давления. В табл. 1 приведены диапазоны изменения характерных параметров ТУК главных двигателей.

**Таблица 1.** Значения некоторых параметров теплоутилизационного контура главных двигателей реализованных и нереализованных проектов газопаротурбинных установок

**Table 1.** Values of some parameters of the main engine control systems of implemented and not implemented GPT projects

№	Параметр	Размерность	Величины
1	Мощность ГТД	МВт	7–22
2	Мощность паровой турбины ТУК	МВт	3,0–11,6
3	Температура газа за ГТД	С	390–524
4	Давление в сепараторе УПГ	МПа	1,0–4,24
5	Температура пара за УПГ	С	310–458
6	Давление в конденсаторе	МПа	0,005–0,01

*Примечание.* ГТД — газотурбинный двигатель; ТУК — теплоутилизационный контур; УПГ — утилизирующий парогенератор.

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ**

## ГАЗОПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Анализ значений параметров морских ГПТУ позволил установить рациональные диапазоны изменения внешних варьируемых для построения модели паровых турбин ТУК с возможностью небольшой экстраполяции при использовании модели. Диапазон изменения мощностей паровой турбины 3–10 МВт. Давление пара на входе в турбину 1–4 МПа. Температура пара на входе 350–495 °С. Давление в конденсаторе 5–10 кПа. Диапазон изменения внешних параметров предопределяет выбор рациональных параметров конструктивной схемы паровой турбины. Далее будут рассмотрены только однокорпусные однопроточные турбины дисково-диафрагменной конструкции (активного типа) с одним впуском пара (для применения в установках с наиболее рациональным в морских условиях одним уровнем давления в УПГ). Для упрощения кинематических схем механических передач и регулирования мощности морской энергетической установки представляется наиболее целесообразным использование паровой турбины ТУК для привода электрогенератора, а не для прямой передачи мощности на винт. Электроэнергия, полученная от турбины ТУК, в этом случае может использоваться для общесудовых нужд или для обеспечения движения судна в установках с частичным или полным электродвижением. Использование ПТ ТУК для привода электрогенератора переменного тока даст возможность применить в турбине ротор гибкого типа, что позволит несколько повысить КПД паровой турбины за счет снижения уровня утечек пара в уплотнениях, которые в турбинах данной размерности могут быть значительными.

Для выбранного диапазона изменения внешних параметров паровой турбины может оказаться целесообразным повышение частоты вращения ротора паровой турбины с установкой одноступенчатого редуктора между турбиной и электрогенератором. В турбоприводах данной размерности такое конструктивное решение применяется известной фирмой «Сименс» и Калужским турбинным заводом. Это позволяет снизить массу блока турбина-



редуктор по сравнению с прямодействующей турбиной с частотой вращения 3000 об/мин. Для нижнего уровня мощностей и повышенных значений начального давления пара это мероприятие приведет к увеличению экономичности турбины (за счет снижения диаметров и получения полноразмерной проточной части в условиях низких значений объемных расходов пара). По этой причине в данной работе будут построены две модели для оценки массы и экономичности паровой турбины ТУК с частотами вращения 3000 об/мин и 8000 об/мин (для верхнего уровня выбранного диапазона мощностей частота вращения 8000 об/мин уже может рассматриваться как завышенная, что приводит к некоторому снижению экономичности в условиях выбора внутренних параметров турбины с учетом ограничений по прочности).

## **ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ**

Исходные данные для построения формальной математической модели паровой турбины получены по результатам концептуального проектирования 144 вариантов паровых турбин с частичной оптимизацией их внутренних параметров. Концептуальное проектирование паровых турбоагрегатов выполнено с использованием многократно верифицированного программного комплекса СПбГМТУ [6].

Для примеров расчета параметров цикла и оборудования морской ГПТУ с учетом различных моделей паровой турбины использована одна из версий соответствующей модели СПбГМТУ [7].

## **ФИКСИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВАРЬИРУЕМЫХ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОНЦЕПТУАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАРИАНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Использован классический метод параметрического исследования с фиксированными значениями внешних варьируемых параметров. Приняты следующие фиксированные значения. Давление пара на входе:  $p_{oo} = 1; 2; 3; 4 \text{ МПа}$ . Температура пара на входе:  $t_{oo} = 350; 441; 492 \text{ С}$ . Давление в конденсаторе:  $p_k = 5; 10 \text{ кПа}$ . Эффективная мощность:  $N_e =$

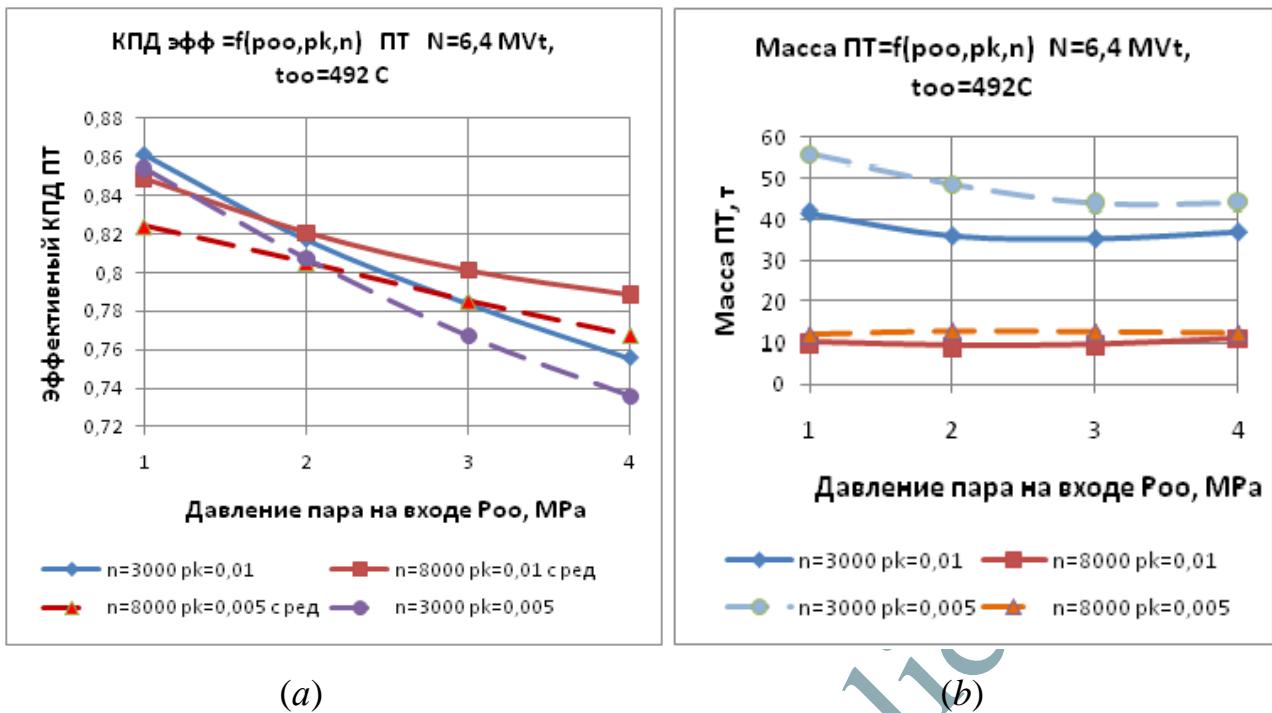
3,2; 6,4; 9,6 МВ т. Частота вращения ротора:  $n = 3000; 8000$  об/мин.  
(Для турбин с частотой вращения ротора  $n = 8000$  об/мин эффективный КПД определен с учетом КПД одноступенчатого редуктора, принятого для всех вариантов равным 0,98.)

## **ВНУТРЕННИЕ ФИКСИРОВАННЫЕ И ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ КОНЦЕПТУАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАРИАНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Для каждого сочетания внешних параметров выполнялась частичная оптимизация внутренних параметров паровой турбины по параметрам последней и регулировочной ступени с контролем напряжений в рабочих лопатках последней ступени и запаса до критической частоты вращения гибкого ротора. Для частоты вращения 3000 об/мин корректировались диаметр думмиса у ротора и утечки в концевые уплотнения. Приняты разумные ограничения числа ступеней с их фиксацией во всех вариантах расчета для  $n=8000$  об/мин на уровне 7 ступеней, для  $n=3000$  об/мин на уровне 17 ступеней. Целевая функция при частичной оптимизации — эффективный КПД турбины. Для некоторых вариантов турбины с  $n=8000$  об/мин при выборе оптимальных параметров приходилось учитывать ограничения по прочности рабочих лопаток последней ступени, что приводило к снижению значений целевой функции.

## **НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОГО КОНТУРА**

На рис. 1 показаны некоторые результаты определения экономичности и массы ПТ ТУК в зависимости от внешних варьируемых параметров по данным концептуальных проектов.



**Рис. 1.** Влияние некоторых внешних параметров на экономичность (а) и массу (b) паровой турбины теплоутилизационного контура по результатам концептуального проектирования.

**Fig. 1.** The influence of some external parameters on the efficiency (a) and weight (b) of a steam turbine of a heat recovery circuit based on the results of conceptual design.

## ФОРМАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОГО КПД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОРСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫМ КОНТУРОМ

Как отмечалось ранее, для повышения точности описания исходных значений параметров формальная модель КПД ПТ построена отдельно для частоты вращения ротора  $n=8000$  об/мин и  $n=3000$  об/мин в виде зависимости  $\eta_e = f(p_{00}, t_{00}, p_k, N_e)$ . С этой же целью КПД сначала описывается для турбин с фиксированной мощностью  $N_e = 3,2; 6,4; 9,6$  МВт обобщенным полиномом [8] вида (1):

$$y = a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_1^3 + a_4 x_2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_3 + a_8 x_1 x_2 x_3 + a_9 x_1^2 x_2 + a_{10} x_1 x_2^2 x_3 + a_{11} x_1^2 x_2^2 x_3, \quad (1)$$

а затем выполняется линейная интерполяция по значению заданной мощности.

В выражении (1) используются следующие обозначения  $y \equiv \eta_e$ ;  $x_1 \equiv p_{00}$  МПа;  $x_2 \equiv t_{00} / 100$  С ;  $x_3 \equiv p_k$  кПа. Коэффициенты полиномов вида (1) определены методом наименьших квадратов [9] по данным результатов концептуального проектирования. При определении эффективного КПД ПТ с  $n=8000$  об/мин учтен КПД одноступенчатого редуктора 0,98. Коэффициенты полинома, стандартные выборочные и максимальные отклонения аппроксимирующих зависимостей приведены в табл. 2 и 3.

**Таблица 2.** Коэффициенты полинома, стандартные выборочные и максимальные отклонения аппроксимирующих зависимостей КПД для частоты вращения ротора 3000

**Table 2.** Coefficients of the polynomial, standard sample and maximum deviations of the approximating efficiency dependences for the rotor speed 3000

n=3000 об/мин							
Ne	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
3,2	7,978E-01	-2,265E-02	3,278E-04	2,340E-02	-2,802E-03	-5,282E-03	5,371E-04
6,4	7,986E-01	-2,355E-02	3,151E-04	3,453E-02	-3,013E-03	-5,591E-03	1,641E-03
9,6	7,987E-01	-1,832E-02	-7,873E-04	3,574E-02	-2,702E-03	-7,566E-03	2,085E-03
Ne	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	СКВО	$\delta_{max}$	-
3,2	2,126E-04	4,152E-05	-2,221E-06	-4,905E-06	0,001164	0,0024114	-
6,4	2,052E-04	5,637E-05	-4,848E-05	7,763E-06	0,000955	0,0020801	-
9,6	1,093E-04	1,373E-03	-3,608E-05	0,000E+00	0,001217	0,0022778	-

**Таблица 3.** Коэффициенты полинома, стандартные выборочные и максимальные отклонения аппроксимирующих зависимостей КПД для частоты вращения ротора 8000

**Table 3.** Coefficients of the polynomial, standard sample and maximum deviations of the approximating efficiency dependences for the rotor speed 8000

n=8000 об/мин							
Ne	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
3,2	7,964E-01	-4,454E-02	4,853E-04	7,010E-03	7,063E-04	2,228E-03	2,161E-03

6,4	4,916E-01	-3,500E-02	7,467E-04	1,221E-01	-1,202E-02	8,372E-03	7,439E-03
9,6	4,166E-01	-4,087E-02	8,996E-04	1,261E-01	-1,133E-02	1,032E-02	7,418E-03
№	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	СКВО	$\delta_{max}$	-
3,2	1,192E-04	4,022E-05	-7,058E-05	5,982E-06	0,0014084	0,0024013	-
6,4	-7,203E-05	-1,608E-03	-1,259E-04	2,693E-05	0,0011574	0,0023824	-
9,6	7,213E-04	-1,462E-03	-1,970E-04	0,000E+00	0,0022882	0,0054279	-

Для всех зависимостей, аппроксимирующих КПД паровой турбины, получена вполне достаточная точность описания исходных данных для уровня концептуального проектирования энергетической установки.

## **ФОРМАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССЫ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОРСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫМ КОНТУРОМ**

Анализ результатов концептуального проектирования показал, что масса паровой турбины относительно слабо зависит от параметров пара на входе в принятом диапазоне их изменения. Полученное расчетное изменение массы в зависимости от этих параметров носит скорее случайный характер и связан главным образом с выбором внутренних параметров турбины. Если принять неопределенность оценки массы турбины по исходной модели на уровне 10% (что, скорее всего, соответствует действительности), то можно пренебречь влиянием параметров пара на входе и оценить массу турбины как ее среднее расчетное значение в принятом диапазоне изменения этих параметров. В результате из внешних параметров, влияющих на массу турбины, остаются давление в конденсаторе, мощность и частота вращения ротора. Для повышения точности описания исходных данных, так же, как и в случае с КПД, разумно построить отдельные модели для частоты вращения ротора  $n=8000$  об/мин и  $n=3000$  об/мин в виде зависимостей  $M_T = f(p_k, N_e)$ . Эта зависимость может быть упрощена, если вместо массы описать удельную массу турбины в следующем виде  $M_T/N_e = f(p_k, N_e)$ . Как показал анализ исходных данных, эта зависимость может быть аппроксимирована линейным двухпараметрическим полиномом с удовлетворительной неопределенностью, следующего вида:

$$y = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_1x_2 . \quad (2)$$

В выражении (2) используются следующие обозначения  $y \equiv M_T/N_e$ ,  $\tau$  /  $M B \tau$ ;  $x_1 \equiv N_e$ ,  $M B \tau$ ;  $x_2 \equiv p_k$ ,  $к П а$ . Коэффициенты полиномов вида (2) определены методом наименьших квадратов по данным результатов концептуального проектирования турбин отдельно для частот вращения ротора  $n=3000$  об/мин и  $n=8000$  об/мин. Коэффициенты полинома, стандартные выборочные и максимальные отклонения аппроксимирующих зависимостей приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Коэффициенты полинома, стандартные выборочные и максимальные отклонения аппроксимирующих зависимостей удельной массы турбины

**Table 4.** Coefficients of the polynomial, standard sample and maximum deviations of the approximating dependences of the specific gravity of the turbine

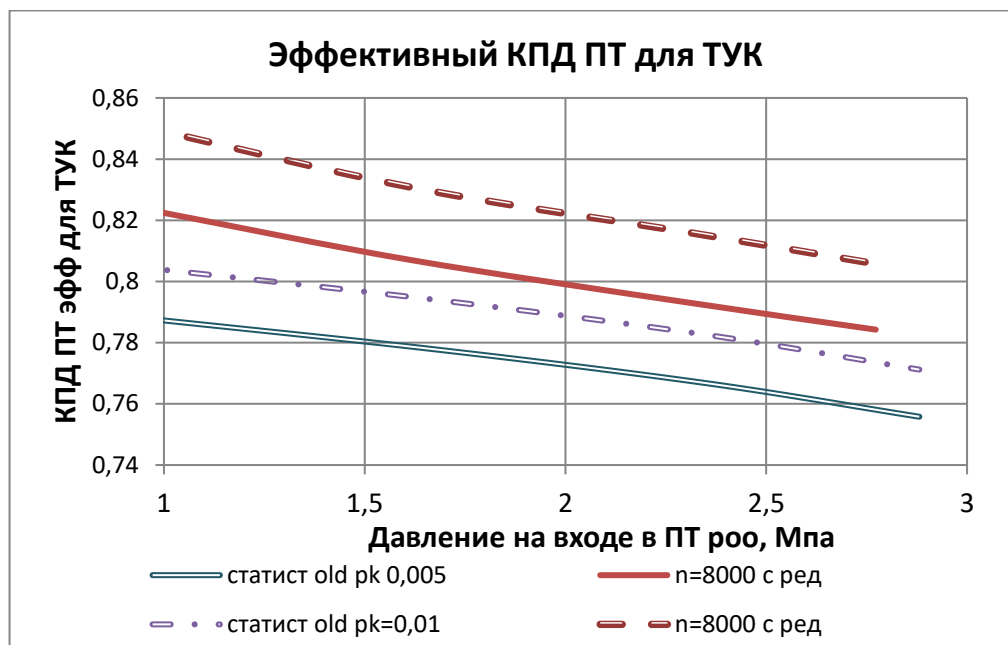
$n$ об/мин	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	СКВО	$\delta_{max}$
3000	10,46181	-0,39388	-0,21806	0,000326	0,0095091	0,017361
8000	4,038194	-0,24089	-0,17708	0,010742	0,0102416	0,017361

## ПРИМЕР СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПО РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КПД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ С ИЗВЕСТНЫМИ РАНЕЕ МОДЕЛЯМИ

Для сравнения с разработанной моделью выбрана модель [3, 4], учитывающая наибольшее число влияющих факторов (мощность, параметры пара на входе, давление на выходе). В модели [2] не учитывается давление на выходе из турбины. Во всех известных нам ранее созданных моделях [1–4] не учитывается влияние частоты вращения ротора, которая может оказывать заметное влияние на экономичность турбины в условиях сравнительно небольших объемных расходов пара.

На рис. 2 представлено сравнение расчетных значений эффективного КПД паровой турбины мощностью 6,5 МВт, вычисленных по предложенной модели и по модели [3, 4]. Варьировались давления на входе ( $p_{00}$ ) и выходе из

турбины ( $p_k = 0,005; 0,01 \text{ МПа}$ ) для одинаковых температур пара на входе ( $t_{00} = 492 \text{ C}$ ). В модели [3, 4] влияние частоты вращения не учитывается, в разработанной модели она задана равной  $n=8000$  об/мин, а КПД турбины определен с учетом КПД одноступенчатого редуктора (принят 0,98).



**Рис. 2.** Сравнение расчетных значений КПД паровой турбины, определенных по модели [3, 4] (обозначено «статист old») и по разработанной модели (обозначено « $n=8000$  с ред.»).

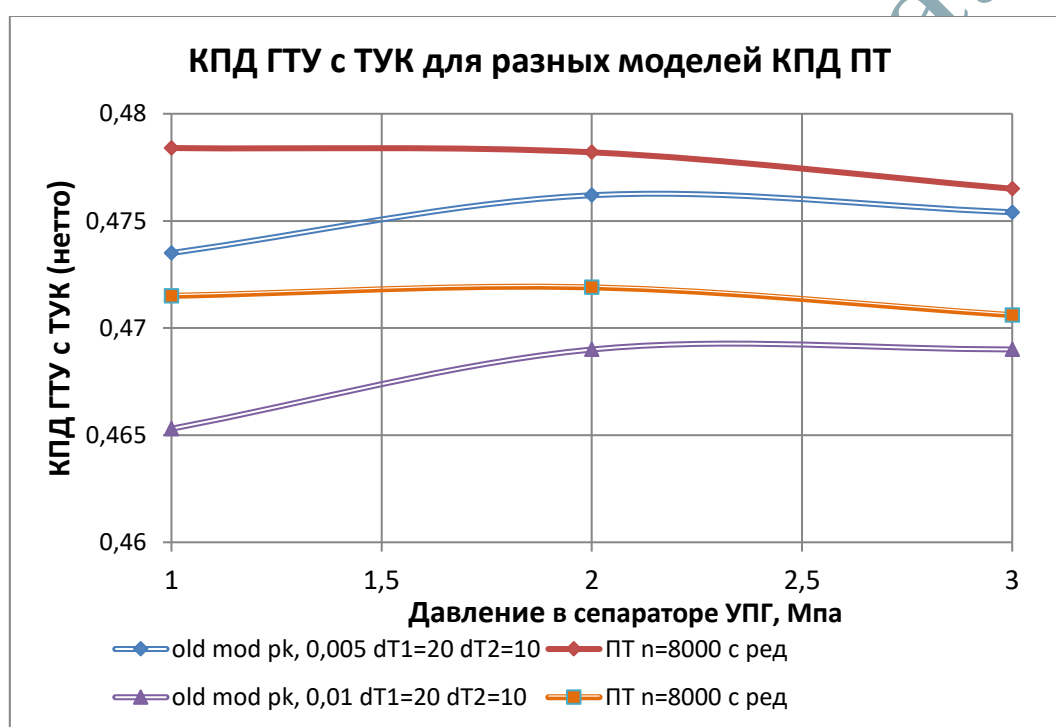
**Fig. 2.** Comparison of the calculated values of steam turbine efficiency determined by the model [3, 4] (marked "statistically") and by the developed model (marked " $n=8000$  ed.").

Как видно из сравнения расчетных данных, КПД, определенный по разработанной модели, имеет несколько более высокие значения (анализ причин такого расхождения был представлен ранее). Кроме того, немного увеличен темп изменения КПД с уменьшением давления на входе. Эти факторы могут оказывать влияние на выбор оптимальных параметров цикла и их целесообразно учитывать на ранней стадии проектирования энергетической установки.

## ПРИМЕР ВЛИЯНИЯ ВЫБРАННОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КПД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫМ

## КОНТУРОМ

С учетом данных по КПД паровых турбин, представленных на рис. 2, выполнен расчет параметров цикла ГТУ с ТУК по модели [7]. Результаты расчета, представленные на рис. 3, демонстрируют влияние использованной модели для оценки КПД паровой турбины на оптимальные по экономичности параметры цикла ТУК. Характер изменения КПД паровой турбины от параметров цикла ТУК приводит к смещению оптимального давления пара в сепараторе в сторону меньших его значений. Одновременно несколько увеличивается и расчетный КПД комбинированной установки.



**Рис. 3.** Влияние принятой модели оценки КПД паровой турбины теплоутилизационного контура на показатели экономичности и оптимальные параметры комбинированной установки (обозначено «статист old») и по разработанной модели (обозначено «n=8000 с ред.»).

**Fig. 3.** The influence of the adopted model for estimating the efficiency of a TUK steam turbine on the efficiency indicators and optimal parameters of a combined installation (indicated by "statistically old") and according to the developed model (indicated by "n=8000 ed.").

Приведенные примеры демонстрируют, что даже на ранних стадиях



проектирования важно правильно оценивать параметры основного оборудования энергетической установки для обоснованного выбора параметров термодинамического цикла.

## **ВЫВОДЫ**

1. Предложена формальная математическая модель для оценки экономичности и массы паровой турбины ТУК в зависимости от основных параметров термодинамического цикла энергетической установки морского применения. В отличие от известных моделей учтено большее число влияющих факторов. Модель построена по результатам концептуального проектирования 144 вариантов паровых турбин с параметрами, характерными для ТУК морской ГТУ.
2. Приведенные примеры расчета параметров энергетической установки демонстрируют необходимость применения достоверных моделей оборудования для обоснованного выбора параметров термодинамического цикла на ранних стадиях проектирования.

## **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Вклад авторов.** Ю.М. Погодин — выполнение вариантов концептуального проектирования, построение формальной модели и подготовка статьи; А.П. Безухов — выполнение вариантов концептуального проектирования и подготовка статьи; Д.А. Лучкин — выполнение вариантов концептуального проектирования. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

**Источники финансирования.** Отсутствуют.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали

ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

## **ADDITIONAL INFO**

**Authors contributions:** Pogodin Yu.M. Implementation of conceptual design options, construction of a formal model, and preparation of an article; Bezukhov A.P. Implementation of conceptual design options and preparation of an article; Luchkin D.A. Implementation of conceptual design options. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** In preparing this work, the authors did not use previously published material (text, illustrations, or data).

**Generative AI:** Generative AI technologies were not used in the preparation of this article.

**Provenance and peer-review:** This work was submitted to the journal on the authors' own initiative and processed under the standard procedure.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Щегляев А.В. Паровые турбины. М.: Энергия, 1976.
2. Зайцев Ю.И. Основы проектирования судовых паровых турбоагрегатов. Л.: Судостроение, 1974.

3. Мохов А.В. Система подпрограмм-функций для ЭВМ серии ЕС. В кн.: Сборник НТО им. А.Н. Крылова. 1982. вып. 366. С. 25–40.
4. Курзон А.Г., Юдовин Б.С. Судовые комбинированные энергетические установки. Л.: Судостроение, 1981.
5. Курзон А.Г., Маслов Л.А. Судовые турбинные установки. Л.: Судостроение, 1991.
6. Погодин Ю.М., Пшеничная К.В. Математическое обеспечение эскизного проектирование судового парового турбоагрегата. Л.: Издание ЛКИ, 1985.
7. Погодин Ю.М., Тихомиров Б.А. Модель и программный комплекс комбинированной газотурбинной установки. В кн.: Материалы XLII научно-технической сессии по проблемам газовых турбин РАН. М.: РАН, 1995. С. 73–74.
8. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М.: Наука, 1967.
9. Погодина М.Ю. Математическое описание внешних характеристик газотурбинного двигателя. В кн.: Третья Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». 13-14 февраля 2014. СПб.: СПбГМТУ, 2014. С. 107–108.

## REFERENCES

1. Shcheglyayev AV. *Steam Turbines*. Moscow: Energiia; 1976. (In Russ.)
2. Zaitsey YI. *Fundamentals of Marine Steam Turbine Unit Design*. Leningrad: Sudostroenie; 1974. (In Russ.)
3. Mokhov AV. A system of subroutine-functions for ES series computers. In: *Collection of Scientific Works of the Krylov Scientific and Technical Society*. 1982;366:25–40. (In Russ.)
4. Kurzon AG, Yudovin BS. *Marine Combined Power Plants*. Leningrad: Sudostroenie; 1981. (In Russ.)
5. Kurzon AG, Maslov LA. *Marine Turbine Plants*. Leningrad: Sudostroenie;

1991. (In Russ.)
6. Pogodin YM, Pshenichnaia KV. *Mathematical foundations for Conceptual Design of a Marine Steam Turbine Unit*. Leningrad: LKI; 1985. (In Russ.)
  7. Pogodin YM, Tikhomirov BA. Model and software package for a combined gas turbine plant. In: *Proceedings of the XLII Scientific and Technical Session on Gas Turbine Problems of the Russian Academy of Sciences*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 1995: 73–74. (In Russ.)
  8. Demidovich BP, Maron IA, Shuvalova EZ. *Numerical Methods of Analysis*. Moscow: Nauka; 1967. (In Russ.)
  9. Pogodina MY. Mathematical description of the external characteristics of a gas turbine engine. In: *The Third All-Russian Scientific and Technical Conference "Current Problems of Marine Power Engineering". February 13-14, 2014; St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: SPbSMTU; 2014:107–108. (In Russ.)

<b>ОБ АВТОРАХ</b>	<b>AUTHORS INFO</b>
<p><b>Погодин Юрий Михайлович</b>, канд. техн. наук, доцент;  e-mail: yu_pogodin@mail.ru;  SPIN-код: 4825-4720</p> <p><b>*Безухов Андрей Павлович</b>, канд. техн. наук, доцент;  Адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;  e-mail: bezuhov@mail.ru;  ORCID: 0009-0009-9883-1323;  SPIN-код: 1220-6160;</p> <p><b>Лучкин Даниил Андреевич</b>;  e-mail: luchkindaniil@rambler.ru</p>	<p><b>Yuri M. Pogodin</b>, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;  e-mail: yu_pogodin@mail.ru;  SPIN-код: 4825-4720</p> <p><b>*Andrey P. Bezukhov</b>, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;  Adress: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation;  e-mail: bezuhov@mail.ru;  ORCID: 0009-0009-9883-1323;  SPIN-код: 1220-6160</p> <p><b>Daniil A. Luchkin</b>;  e-mail luchkindaniil@rambler.ru</p>

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Accepted for publication