

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОССИЙСКИХ ГТУ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Индерейкин А.В., Кудинов А.А.

Самарский государственный технический университет, Самара

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования гибридной системы централизованного теплоснабжения на базе атомной станции теплоснабжения (АСТ) и газотурбинных теплоэлектроцентралей (ГТУ-ТЭЦ) различной единичной мощности. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения маневренности и экологичности систем теплоснабжения в условиях перехода к низкоуглеродной энергетике. Разработана методика расчета переменных режимов работы для четырех российских газовых турбин: ГТЭ-25У, ГТЭ-65, ГТД-110М и ГТЭ-170.2. Методика включает расчет КПД, расхода топлива, параметров уходящих газов и тепловой мощности котлов-утилизаторов в диапазоне относительных нагрузок от 0,4 до 1,0. Проведено моделирование работы гибридной системы при различных конфигурациях пикового блока. Установлено, что использование ГТУ меньшей мощности обеспечивает лучшую маневренность и снижение удельных выбросов на частичных нагрузках, в то время как более мощные ГТУ отличаются высшими показателями в номинальном режиме. Наибольшую эффективность показала комбинированная конфигурация с использованием ГТУ разной мощности. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по выбору оптимальной единичной мощности ГТУ для гибридных систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** гибридная система теплоснабжения, АСТ, ГТУ-ТЭЦ, переменные режимы, российские газовые турбины, энергоэффективность, выбросы.

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A HYBRID HEAT SUPPLY SYSTEM USING RUSSIAN GTUS OF VARIOUS CAPACITIES

Artyom Indereykin, Anatoly Kudinov

Samara State Technical University, Samara

### Abstract

The paper presents the results of a study of a hybrid centralized heat supply system based on a nuclear heat supply station (NHSS) and gas turbine combined heat and power plants (GTU-CHPP) of various unit capacities. The relevance of the work is due to the need to increase the flexibility and environmental friendliness of heat supply systems in the transition to low-carbon energy. A methodology for calculating variable operating modes for four Russian gas turbines has been developed: GTE-25U, GTE-65, GTD-110M and GTE-170.2. The methodology includes the calculation of electrical efficiency, fuel consumption, exhaust gas parameters and thermal power of waste heat boilers in the range of relative loads from 0.4 to 1.0. Simulation of the hybrid system operation with different peak block configurations has been carried out. It has been established that the use of lower capacity GTUs provides better maneuverability and reduction of specific emissions at partial loads, while higher capacity GTUs demonstrate higher performance in the nominal mode. The combined configuration using GTUs of different capacities showed the greatest efficiency. The practical significance of the work lies in the development of recommendations for choosing the optimal unit capacity of GTUs for hybrid heat supply systems.

**Keywords:** hybrid heat supply system, NHSS, GTU-CHPP, variable modes, Russian gas turbines, energy efficiency, emissions.



## Введение

Современная энергетика характеризуется тенденцией к декарбонизации и повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов [1]. В системах централизованного теплоснабжения это приводит к необходимости внедрения гибридных схем, сочетающих стабильные низкоуглеродные источники, такие как атомные станции теплоснабжения (АСТ), и маневренные газотурбинные ТЭЦ (ГТУ-ТЭЦ) [2]. Преимуществом АСТ является стабильное базовое покрытие нагрузки, а ГТУ-ТЭЦ позволяют оперативно регулировать тепловую и электрическую мощность, компенсируя переменную часть графика нагрузки [3].

Ключевым вопросом при проектировании таких систем является выбор единичной мощности ГТУ. Существующие исследования в основном посвящены анализу работы гибридных систем с ГТУ одинаковой мощности. Однако использование агрегатов разной мощности может позволить более гибко и эффективно покрывать нагрузку, минимизируя работу в неэкономичных частичных режимах. Целью данной работы является сравнительный анализ эффективности гибридной системы теплоснабжения при использовании российских ГТУ различной единичной мощности (ГТЭ-25У, ГТЭ-65, ГТД-110М, ГТЭ-170.2) на переменных нагрузках [4, 5].

## Материалы и методы

### Объект исследования

Объектом исследования является гибридная система теплоснабжения, состоящая из АСТ базовой мощностью 200 МВт и пикового блока на основе ГТУ-ТЭЦ суммарной мощностью до 200 МВт. Схема гибридной системы защищена патентом РФ № 2842167 от 23.06.2025. представлена на рис. 1.

Рассматриваются четыре конфигурации пикового блока:

- Конфигурация А: 7 × ГТЭ-25У (суммарно 207,9 МВт)
- Конфигурация Б: 3 × ГТЭ-65 (суммарно 203,1 МВт)
- Конфигурация В: 2 × ГТД-110М (суммарно 236 МВт)
- Конфигурация Г: 1 × ГТЭ-170.2 (170 МВт) + 1 × ГТЭ-25У (29,7 МВт)

### Методика расчета

Методика расчета основана на методе приведенных параметров и анализе универсальных характеристик в соответствии с [6]. Для каждой ГТУ-ТЭЦ построены зависимости от относительной нагрузки  $\theta = N_{\text{э}}/N_{\text{э.ном}}$ :

– электрическая мощность, МВт:

$$N_{\text{э}}(\theta) = \theta \times N_{\text{э.ном}}; \quad (1)$$

– КПД газотурбинной установки:

$$\eta(\theta) = \eta_{\text{ном}} \times [1 - 0,25 \times (1 - \theta) - 0,15 \times (1 - \theta)^2]; \quad (2)$$

– расход топлива, кг/с:

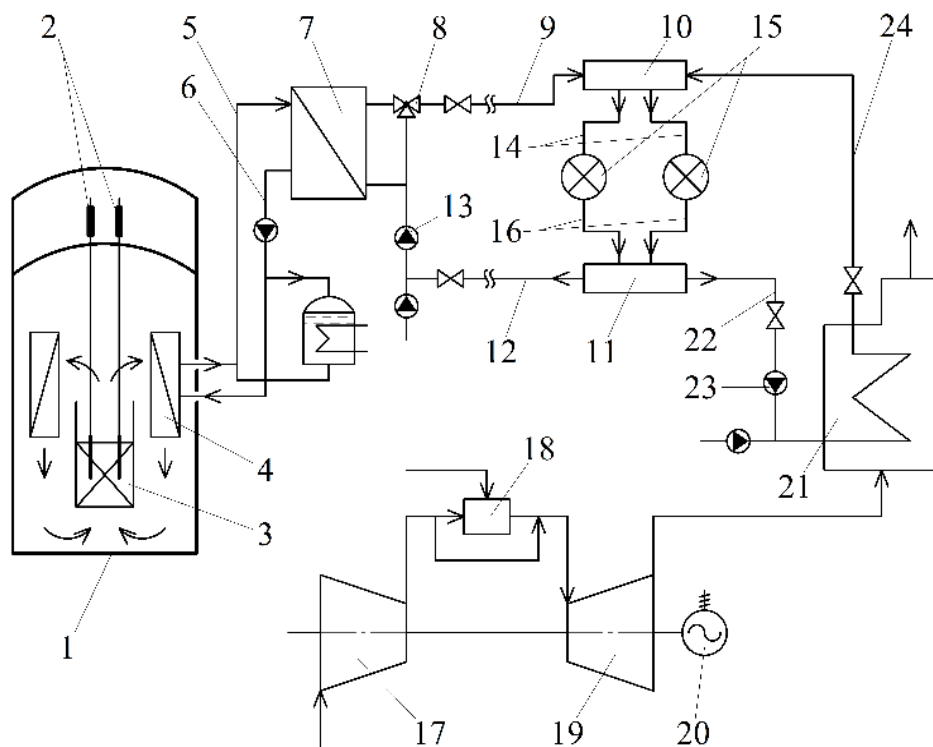
$$B(\theta) = N_{\text{э}}(\theta) / (\eta(\theta) \times Q_{\text{нр}}); \quad (3)$$

где  $Q_{\text{нр}} = 48000$  кДж/кг - теплота сгорания природного газа

– расход уходящих газов, кг/с:

$$G_{\text{г}}(\theta) = G_{\text{г.ном}} \times (0,2 \times \theta + 0,8); \quad (4)$$





**Рис. 1. Гибридная система теплоснабжения.**

1 – ядерный реактор; 2 – система регулирования тепловыделения; 3 – активная зона; 4 – встроенные теплообменники; 5, 6 – подающий и обратный трубопроводы промежуточного контура; 7 – подогреватель сетевой воды; 8 – регулирующий клапан; 9, 12 – подающий и обратный магистральные водопроводы; 10, 11 – подающий и обратный сборно-распределительные коллекторы; 13 – сетевой насос; 14, 16 – подающие и обратные распределительные трубопроводы; 15 – теплообменные аппараты тепловых потребителей; 17 – турбокомпрессор; 18 – камера сгорания; 19 – газовая турбина; 20 – электрогенератор; 21 – водогрейный котел-утилизатор; 22, 24 – обратный и подающий магистральные трубопроводы; 23 – циркуляционный насос.

– температура уходящих газов после ГТУ, °С:

$$t_{Г}(\theta) = t_{Г,ном} - 40 \times (1 - \theta); \tag{5}$$

– тепловая мощность котла-утилизатора, МВт:

$$Q_{ку}(\theta) = G_{Г}(\theta) \times c_{р,газа} \times (t_{Г}(\theta) - t_{ух}) \times 10^{-3}; \tag{6}$$

где  $c_{р,газа} = 1,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$  - теплоемкость газов,  $t_{ух} = 100 \text{ °С}$  - температура отработавших в котле-утилизаторе газов

– Выбросы  $CO_2$ , кг/с:

$$m_{CO_2}(\theta) = B(\theta) \times EF_{CO_2}; \tag{7}$$

где  $EF_{CO_2} = 2,75 \text{ кг}/\text{кг}$  - эмиссионный фактор.

Исходные номинальные параметры ГТУ-ТЭЦ представлены в табл. 1.

### Результаты

На основе разработанной методики выполнены расчеты для всех рассматриваемых турбин в диапазоне  $\theta = 0,4 \dots 1,0$ . Детальные результаты расчетов представлены в табл. 2-5.



Таблица 1

**Номинальные параметры российских ГТУ**

Параметр	ГТЭ-25У	ГТЭ-65	ГТД-110М	ГТЭ-170.2
Электрическая мощность, МВт	29,7	67,7	118	170
КПД	0,306	0,362	0,360	0,351
Температура уходящих газов, °С	476	555	517	539
Расход уходящих газов, кг/с	123,4	195	361	535

Таблица 2

**Параметры работы ГТЭ-25У на переменных нагрузках**

$\theta$	$N_{э}(\theta)$ , МВт	$\eta(\theta)$	$B(\theta)$ , кг/с	$G_{г}(\theta)$ , кг/с	$t_{г}(\theta)$ , °С	$Q_{ку}(\theta)$ , МВт	$mCO_2(\theta)$ , кг/с
1	29,70	0,31	2,02	123,40	476,00	50,11	5,56
0,9	26,73	0,30	1,87	120,93	472,00	48,59	5,14
0,8	23,76	0,29	1,71	118,46	468,00	47,08	4,71
0,7	20,79	0,28	1,55	116,00	464,00	45,60	4,27
0,6	17,82	0,27	1,38	113,53	460,00	44,14	3,81
0,5	14,85	0,26	1,21	111,06	456,00	42,70	3,32
0,4	11,88	0,24	1,02	108,59	452,00	41,28	2,79

Таблица 3

**Параметры работы ГТЭ-65 на переменных нагрузках**

$\theta$	$N_{э}(\theta)$ , МВт	$\eta(\theta)$	$B(\theta)$ , кг/с	$G_{г}(\theta)$ , кг/с	$t_{г}(\theta)$ , °С	$Q_{ку}(\theta)$ , МВт	$mCO_2(\theta)$ , кг/с
1	67,7	0,36	3,90	195,00	555,00	95,82	10,71
0,9	60,93	0,35	3,60	191,10	551,00	93,08	9,91
0,8	54,16	0,34	3,30	187,20	547,00	90,37	9,08
0,7	47,39	0,33	2,99	183,30	543,00	87,70	8,23
0,6	40,62	0,32	2,67	179,40	539,00	85,06	7,34
0,5	33,85	0,30	2,33	175,50	535,00	82,45	6,40
0,4	27,08	0,29	1,96	171,60	531,00	79,88	5,38

Таблица 4

**Параметры работы ГТД-110М на переменных нагрузках**

$\theta$	$N_{э}(\theta)$ , МВт	$\eta(\theta)$	$B(\theta)$ , кг/с	$G_{г}(\theta)$ , кг/с	$t_{г}(\theta)$ , °С	$Q_{ку}(\theta)$ , МВт	$mCO_2(\theta)$ , кг/с
1	118,00	0,36	6,83	361,00	517,00	162,58	18,78
0,9	106,20	0,35	6,31	353,78	513,00	157,80	17,36
0,8	94,40	0,34	5,79	346,56	509,00	153,08	15,91
0,7	82,60	0,33	5,24	339,34	505,00	148,43	14,42
0,6	70,80	0,32	4,68	332,12	501,00	143,83	12,86
0,5	59,00	0,30	4,08	324,90	497,00	139,30	11,21
0,4	47,20	0,29	3,43	317,68	493,00	134,84	9,44

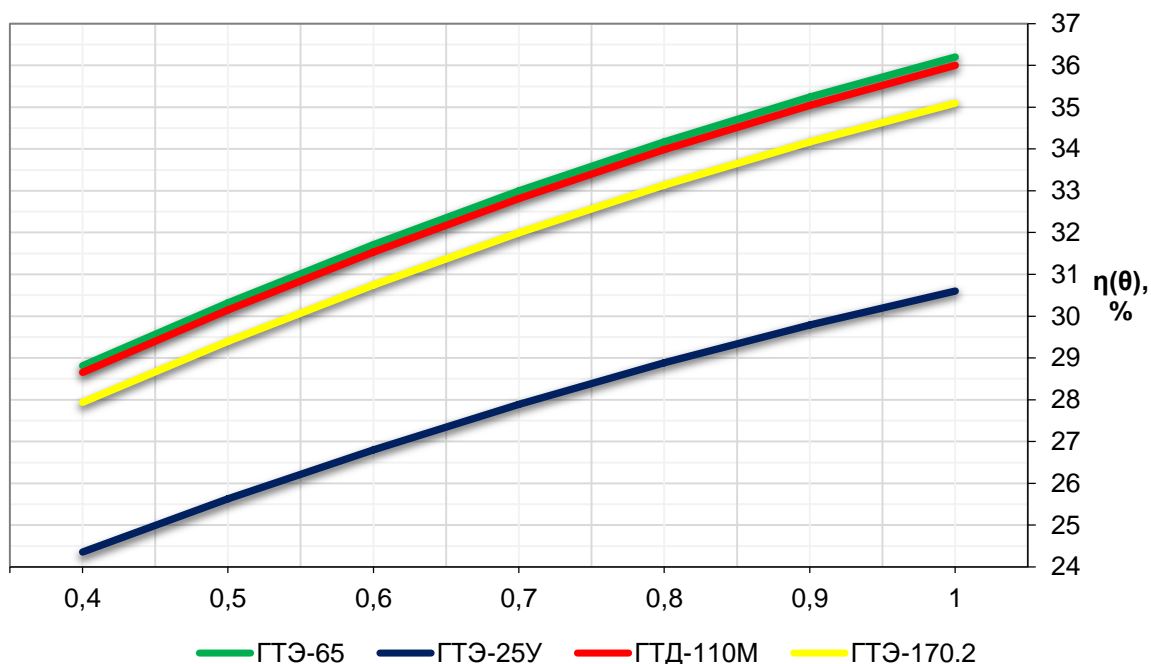
Таблица 5

**Параметры работы ГТЭ-170.2 на переменных нагрузках**

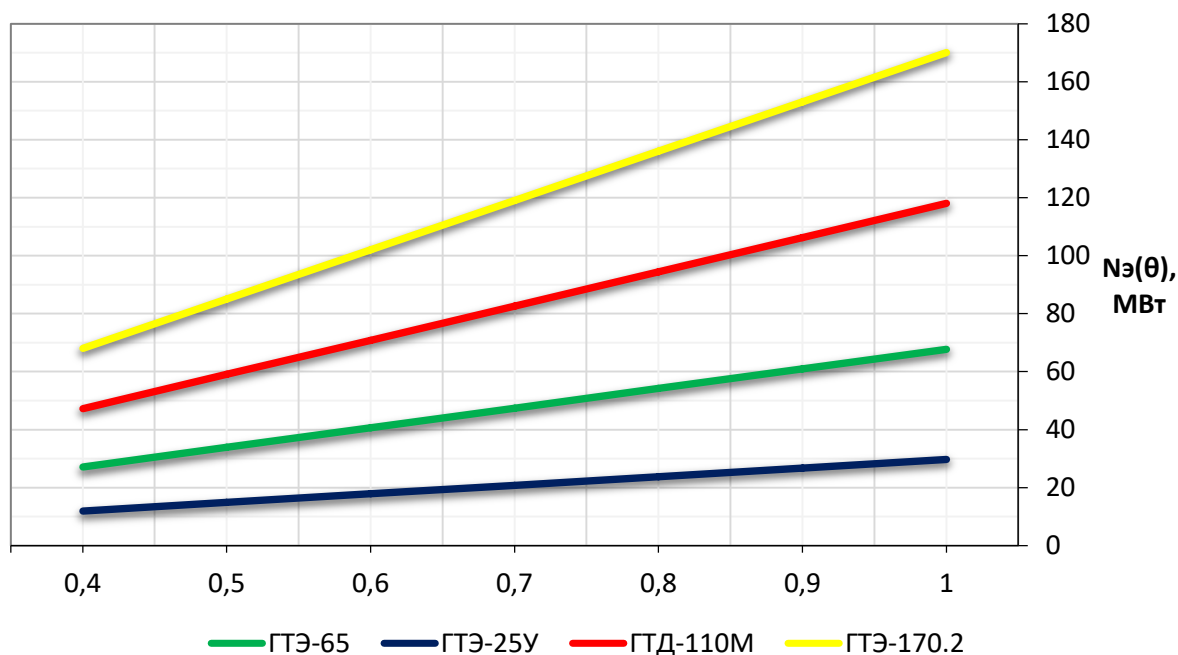
$\theta$	$N_{э}(\theta)$ , МВт	$\eta(\theta)$	$B(\theta)$ , кг/с	$G_{г}(\theta)$ , кг/с	$t_{г}(\theta)$ , °С	$Q_{ку}(\theta)$ , МВт	$mCO_2(\theta)$ , кг/с
1	170,00	0,35	10,09	535,00	539,00	253,65	27,75
0,9	153,00	0,34	9,33	524,30	535,00	246,32	25,65
0,8	136,00	0,33	8,55	513,60	531,00	239,07	23,52
0,7	119,00	0,32	7,75	502,90	527,00	231,92	21,31
0,6	102,00	0,31	6,91	492,20	523,00	224,86	19,01
0,5	85,00	0,29	6,02	481,50	519,00	217,89	16,57
0,4	68,00	0,28	5,07	470,80	515,00	211,01	13,94



Для наглядного сравнения характеристик турбин на переменных нагрузках на Рис. 2 представлена зависимость КПД от относительной нагрузки, а на Рис. 3 – зависимость электрической мощности от относительной нагрузки для всех четырех ГТУ.



**Рис. 2. Зависимость КПД от относительной нагрузки для российских ГТУ различной мощности**



**Рис. 3. Зависимость тепловой мощности котлов-утилизаторов от относительной нагрузки**



## Обсуждение

Анализ результатов показал существенные различия в характеристиках рассматриваемых конфигураций. Принципы построения эффективных теплоэлектроцентралей, рассмотренные в [1], подтверждают преимущества использования маневренных ГТУ-ТЭЦ для покрытия переменной части нагрузки.

Конфигурация А (7×ГТЭ-25У) обладает наивысшей маневренностью благодаря возможности точного подбора работающего оборудования под текущую нагрузку. Это позволяет минимизировать работу на неэкономичных режимах и обеспечивает наилучшие экологические показатели.

Конфигурация Б (3×ГТЭ-65) занимает промежуточное положение, демонстрируя удовлетворительные показатели как по маневренности, так и по эффективности в диапазоне нагрузок 50-100%.

Конфигурация В (2×ГТД-110М) имеет наивысший КПД в номинальном режиме, но теряет эффективность при снижении нагрузки ниже 70%. Низкая маневренность делает ее непригодной для покрытия резко переменных нагрузок.

Конфигурация Г (1×ГТЭ-170.2 + 1×ГТЭ-25У) показала наилучшие комплексные характеристики, сочетая высокую эффективность в базовом режиме (за счет ГТЭ-170.2) и хорошую маневренность (за счет ГТЭ-25У). Подобные комбинированные подходы к регулированию нагрузки рассматриваются в [7].

## Выводы

1. Разработана методика расчета гибридной системы теплоснабжения на базе АСТ и ГТУ-ТЭЦ, позволяющая проводить сравнительный анализ конфигураций с ГТУ различной единичной мощности.

2. Установлено, что использование ГТУ меньшей мощности (ГТЭ-25У) обеспечивает повышенную маневренность и снижение удельных выбросов на 3-5% по сравнению с использованием более мощных ГТУ за счет работы в зонах более высокого КПД на частичных нагрузках.

3. Показано, что комбинированное использование ГТУ разной мощности в рамках одной гибридной системы позволяет максимизировать суммарный КПД и минимизировать выбросы за счет оптимизации распределения нагрузки между агрегатами.

4. Для условий переменного графика тепловой нагрузки наиболее эффективной является комбинированная конфигурация с использованием ГТУ разной мощности.

## Библиографический список

1. **Рогалев Н. Д., Дудолин А. А., Олейникова Е. Н.** Тепловые электрические станции: учебник. – М.: НИУ МЭИ, 2022. — 768 с.
2. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 648 с. (Серия «Теплоэнергетика и теплотехника»; Кн. 3).
3. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учебное пособие.– М.: Инфра-М, 2024. – 325 с.
4. **Лавыгин В.М., Стерман Л.С., Тишин С.Г.** Тепловые и атомные электростанции: учебник. – М.: Изд. домо МЭИ, 2010. – 464 с.
5. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2020. – 584 с.
6. **Костюк А. Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д.** Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 557 с.
7. **Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С., Осыка А. С.** Газотурбинные энергетические установки: уч. пос. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – 428 с.



## References

1. Rogalev, N. D., Dudolin, A. A., & Oleynikova, E. N. (2022). *Teplovye elektricheskie stancii* [Thermal Power Plants: Textbook]. NIY MPEI. [In Russian]
2. Klimenko, A. V., & Zorin, V. M. (Eds.). (2007). *Teplovye i atomnye elektricheskie stancii* [Thermal and Nuclear Power Plants: Handbook]. Izd-vo MPEI. [In Russian]
3. Kudinov, A. A. (2024). *Teplovye elektricheskie stancii. Skhemy i oborudovanie* [Thermal Power Plants. Circuits and Equipment: A Textbook]. Infra-M. [In Russian]
4. Lavygin, V. M., Sterman, L. S., & Tishin, S. G. (2010). *Teplovye i atomnye elektrostancii* [Thermal and Nuclear Power Plants: Textbook]. Izd. dom MPEI. [In Russian]
5. Tsanev, S. V., Burov, V. D., & Remezov, A. N. (2020). *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh elektrostancij* [Gas Turbine and Combined-Cycle Units of Thermal Power Plants: A Textbook for Universities]. Izd-vo MPEI. [In Russian]
6. Kostyuk, A. G., Frolov, V. V., Bulkin, A. E., & Trukhnii, A. D. (2016). *Parovye i gazovye turbiny dlya elektrostancij* [Gas Turbines for Power Plants: A Textbook for Universities]. Izdatel'skij dom MPEI. [In Russian]
7. Tsanev, S. V., Burov, V. D., Zemtsov, A. S., & Osyka, A. S. (2011). *Gazoturbinnye energeticheskie ustanovki* [Gas Turbine Power Plants: A Textbook for Universities]. Izdatel'skij dom MPEI. [In Russian]

## Сведения об авторах

**Индерейкин Артём Викторович**, аспирант, кафедра «Тепловые электрические станции», Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Самара.

**Кудинов Анатолий Александрович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Тепловые электрические станции», Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Самара, SPIN-код: [5503-2226](https://orcid.org/5503-2226).

## Authors about

**Artyom V. Indereykin**, Postgraduate Student, Department of Thermal Power Plants, Samara State Technical University (SamSTU), Samara.

**Anatoly A. Kudinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Thermal Power Plants, Samara State Technical University (SamSTU), Samara.

## Ссылки для цитирования

Индерейкин А.В., Кудинов А.А. Сравнительный анализ эффективности гибридной системы теплоснабжения с использованием российских ГТУ различной мощности // Энергетические системы. 2025. – № 4. – С. 65-71.

Indereykin, A., & Kudinov, A. (2025). Comparative Analysis of the Efficiency of a Hybrid Heat Supply System Using Russian GTUs of Various Capacities. *Energy Systems*, 3, 65-71. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.07>

