

А.В. ИНДЕРЕЙКИН, аспирант гр. 2-УПНК-2.4.5 (СамГТУ)

А.А. КУДИНОВ, д.т.н., профессор (СамГТУ)

г. Самара

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ ГТУ-ТЭЦ

В условиях перехода к низкоуглеродной энергетике и стремления к повышению энергоэффективности и экологической безопасности, развитие гибридных систем теплоснабжения становится актуальным. Атомная станция теплоснабжения (АСТ) обеспечивают стабильное базовое покрытие нагрузки, но имеют ограниченную способность к регулированию тепловой мощности [1]. Преимуществом газотурбинных теплоэлектроцентралей (ГТУ-ТЭЦ) является оперативное регулирование тепловой и электрической нагрузок, однако при работе ГТУ имеются выбросы вредных веществ и углекислого газа в атмосферу. Использование совместных схем на основе АСТ и ГТУ-ТЭЦ позволяет объединить преимущества обоих типов установок и компенсировать их недостатки [1,2].

Схема гибридной установки (рис. 1.) включает атомный и газотурбинный контуры, связанные через теплообменники и магистральные трубопроводы [2,3]. Атомная станция теплоснабжения обеспечивает стабильное теплоснабжение, а газотурбинная установка с котлом-utiлизатором покрывает переменную нагрузку, что повышает надёжность энергоснабжения в отопительный период.

На атомной станции теплоснабжения устанавливаются два ядерных реактора единичной мощностью по 25% от максимальной мощности гибридной системы централизованного теплоснабжения, а остальные 50% мощности системы теплоснабжения будут покрываться отопительной ГТУ-ТЭЦ, включающей не менее чем две одинаковые газотурбинные установки с водогрейными котлами-utiлизаторами [3]. При этом базовая нагрузка, составляющая 50% от максимальной нагрузки, будет покрываться АСТ в течение всего периода работы гибридной системы централизованного теплоснабжения 8000-8760 часов в год, а пиковая и полупиковая части суммарной нагрузки в зимний и переходный периоды времени будут покрываться отопительной ГТУ-ТЭЦ [4].

Расчет выполнен для ГТУ-ТЭЦ на базе ГТЭ-65. Для описания работы ГТЭ-65 на переменных режимах используется относительная нагрузка $\theta = N/N_{\text{ном}}$ [4,5], по которой определяются: электрическая мощность $N(\theta)$,

коэффициент полезного действия $\eta(\theta)$, температура газов на входе в котёл утилизатор (КУ) $t_{\text{г.вх}}(\theta)$, массовый расход топлива $B(\theta)$, кг/с.

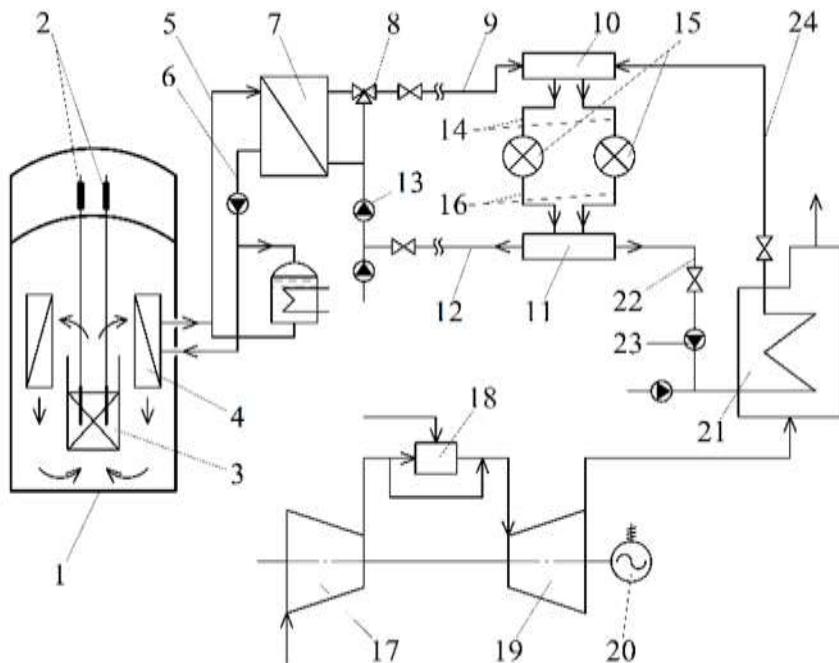


Рис. 1. Гибридная система теплоснабжения: 1 – ядерный реактор; 2 – система регулирования тепловыделения; 3 – активная зона; 4 – встроенные теплообменники; 5, 6 – подающий и об-ратный трубопроводы промежуточного контура; 7 – подогреватель сетевой воды; 8 – регулирующий клапан; 9, 12 – подающий и обратный 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 19; 20 – электрогенератор; 21 – водогрейный котел-utiлизатор; 22, 24 – обратный и подающий магистральные трубопроводы; 23 – циркуляционный насос.

Алгоритм распределения нагрузки. Базовая тепловая нагрузка (200 МВт) покрывается АСТ, переменная часть (до 200 МВт) – тремя ГТЭ-65. При снижении нагрузки часть агрегатов отключается. Подбор θ выполнялся так, чтобы суммарная нагрузка соответствовала графику потребления, при этом выполнялись ограничения: доля нагрузки ГТУ-ТЭЦ составляет 50 %, температура отработавших в котле-utiлизаторе газов равна 80–100 °C.

Тепловая мощность котла-utiлизатора определяется из уравнения теплового баланса [5,6]:

**VIII Международная молодежная научно-практическая
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

116-3

21-22 ноября 2025 г.

$$Q_{\text{ку}} = G_{\text{г}} \times c_{p,\text{г}} \times (t_{\text{г.вх}} - t_{\text{г.вых}}) = G_{\text{в}} \times c_{p,\text{в}} \times (t_{\text{в.вх}} - t_{\text{в.вых}}), [\text{МВт}] \quad (1)$$

где $Q_{\text{ку}}$ – тепловая мощность, кВт; $G_{\text{г}}$ – массовый расход газов, кг/с; $c_{p,\text{г}} = 1,08 \text{ кДж/(кг}\times\text{К)}$ – теплоёмкость газа; $t_{\text{г.вх}}$ – температура газов на входе в котёл, °C; $t_{\text{г.вых}} = 80-100$ °C – температура уходящих газов; $G_{\text{в}}$ – массовый расход сетевой воды, кг/с; $c_{p,\text{в}} = 4,19 \text{ кДж/(кг}\times\text{К)}$ – теплоемкость воды; $t_{\text{в.вх}}$, $t_{\text{в.вых}}$ – температуры сетевой воды на входе и выходе в котёл, °C, определяемые по графику 150/70 °C.

Расчётные температуры в тепловой сети приняты в соответствии с нормами проектирования для систем централизованного теплоснабжения.

Расчёт выбросов. Массовый расход CO₂ [7]:

$$mCO_2(\theta) = EFCO_2 \times B(\theta), [\text{кг/с}] \quad (2)$$

где $EFCO_2 \approx 2,75$ кг/кг топлива – эмиссионный фактор для природного газа.

Выбросы NO_x определялись по нормативной концентрации в стандартных условиях [7]:

$$mNO_x(\theta) = CNO_x \times V_{\text{г.ст}}(\theta), [\text{кг/с}] \quad (3)$$

где $CNO_x = 50 \text{ мг}/\text{м}^3$, $V_{\text{г.ст}}(\theta)$ – объёмный расход дымовых газов, приведённый к стандартной температуре и давлению, м³/с, зависящий от θ .

На основе методики, приведённой выше, был выполнен расчёт рабочих параметров ГТУ-ТЭЦ для различных значений относительной нагрузки θ . Результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1
Сводная таблица результатов расчета

Относительная нагрузка $\theta = N/N_{\text{ном}}$	Электрическая мощность, $N_{\text{э}}, \text{МВт}$	КПД электродвигателя ГТУ, η	Массовый расход уходящих газов, $G_{\text{г}}, \text{кг/с}$	Расход топлива, $B, \text{кг/с}$	$mCO_2, \text{кг/с}$	$mNO_x, \text{кг/с}$
1,0	67,7	0,362	195,0	3,74	10,28	0,008099
0,8	52,965	0,352	183,3	3,01	8,27	0,007612
0,6	38,597	0,342	171,6	2,25	6,20	0,007125
0,4	24,709	0,332	159,9	1,49	4,09	0,006638

Согласно данным таблицы 1, снижение θ приводит к уменьшению электрической мощности, расхода топлива и соответствующих выбросов CO₂ и NO_x. При этом изменение КПД в диапазоне нагрузок от 1,0 до 0,4

остаётся незначительным, что подтверждает устойчивость характеристик установки при работе на частичных нагрузках.

Расчёт тепловой мощности котла-утилизатора при различных температурных графиках теплосети приведён в таблице 2. Полученные значения показывают, что уменьшение наружной температуры сопровождается снижением тепловой нагрузки и, соответственно, тепловой мощности КУ, тогда как расход сетевой воды возрастает в соответствии с расчётными температурными режимами.

Таблица 2
Результаты теплового расчета для различных режимов ($\theta = 1,0$)

Режим	Температура наружного воздуха, $t_{\text{н.в.}}$, °C	Температура сетевой воды на входе в КУ $t_{\text{в.вх.}}$, °C	Температура сетевой воды на выходе из КУ $t_{\text{в.вых.}}$, °C	Тепловая мощность котла-утилизатора, $Q_{\text{ку}}$, МВт
1	-28	150	70	195,0
2	-15	130	65	183,3
3	0	95	55	171,6
4	-8	70	45	159,9

Эффективность гибридной схемы подтверждается снижением удельных выбросов и повышением манёвренности по сравнению с традиционными ТЭС. Применение смесительных сборно-распределительных коллекторов [3] (см. рис 1) позволяет гибко регулировать нагрузку, а отключение части ГТУ снижает избыточные потери [8].

Проведённые исследования подтвердили эффективность применения гибридной схемы теплоснабжения, включающей АСТ и ГТУ-ТЭЦ на базе ГТЭ-65. Методика расчёта позволяет учитывать переменные режимы работы, характеристики котла-утилизатора, гидравлику и выбросы. Моделирование показало, что температура уходящих газов поддерживается равной 80–100 °C, а доля тепловой нагрузки от ГТУ-ТЭЦ не превышает 50 %. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения гибридных схем на объектах централизованного теплоснабжения для повышения манёвренности, снижения удельных выбросов и обеспечения надёжного покрытия пиковых тепловых нагрузок.

Список литературы:

1. Рогалев, Н. Д. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / Н. Д. Рогалев, А. А. Дудолин, Е. Н. Олейникова. – М.: Инфра-М, 2022. – 412 с.
2. Морголов, Ю. Н. Атомные электрические станции: учебник для вузов / Ю. Н. Морголов. – М.: Издательство МЭИ, 2020. – 476 с.

-
- 3. Гибридная система централизованного теплоснабжения: пат. 2842167 Рос. Федерации. № 2023134567; заявл. 15.12.2023; опубл. 23.06.2025 / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, А. В. Индерейкин, И. П. Павлов. – Бюл. № 18.
 - 4. Кудинов, А. А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учебное пособие для вузов / А. А. Кудинов. – М.: Инфра-М, 2023. – 325 с.
 - 5. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учебное пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Бурков, А. Н. Ремизов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 584 с.
 - 6. Kehlhofer, R. Combined-cycle Gas and Steam Turbine Power Plants / R. Kehlhofer, B. Rukes, F. Hannemann, F. Stirnimann. – Lilburn: Fairmont Press, 1990. – 382 р
 - 7. Трухний, В. Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / В. Д. Трухний, В. А. Быков, А. С. Коптев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – 388 с.
 - 8. Воробьёв, А. И. Газотурбинные установки и парогазовые циклы тепловых электростанций / А. И. Воробьёв. – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – 412 с.

Информация об авторах:

Индерейкин Артём Викторович, аспирант, СамГТУ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, tef@samgtu.ru.

Кудинов Анатолий Александрович, д.т.н., профессор, СамГТУ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, tef@samgtu.ru.