Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.01.05

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/384-400

***О. Д. Меирбекова[1], Н. Т. Рустамов[2], А. Н. Бергузинов[3], Г. А. Тулебаева[4], Ш. А. Бабахан[5]**

[1,2,4,5]Международный казахско-турецкий
университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
Республика Казахстан, г. Туркестан;
[3]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0949-1443
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6437-6600
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6954-8259
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8886-6381
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7723-0045
*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ГИБРИДНАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА С ВОДЯНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ НА БИОГАЗЕ

В статье подробно рассматриваются конструктивные особенности, энергетическая эффективность и динамические характеристики гибридной газотурбинной установки, функционирующей на биогазе и интегрированной с водяным тепловым аккумулятором. Предлагаемая система обеспечивает совместную выработку электрической и тепловой энергии, что позволяет существенно повысить степень использования первичного топлива и снизить энергетические потери. Разработана нелинейная математическая модель, учитывающая динамику основных компонентов установки, включая ротор, камеру сгорания, систему подачи топлива и тепловой аккумулятор. Для проведения аналитических исследований модель была линеаризована в окрестности номинального режима и представлена в форме пространства состояний. С использованием методов численного моделирования проанализированы переходные процессы при изменении расхода топлива и внешних нагрузок. Установлено, что гибридизация системы не приводит к ухудшению её механической устойчивости, однако формирует дополнительный инерционный тепловой контур с замедленной динамикой. Интеграция теплового

аккумулятора обеспечивает эффективную утилизацию тепла выхлопных газов, повышая общий коэффициент полезного действия установки и её энергетическую гибкость. Сделан вывод о целесообразности применения современных многоконтурных и адаптивных систем управления, особенно в условиях переменных режимов эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинная установка, биогаз, гибридная энергетическая система, тепловой аккумулятор, математическая модель, система управления.

Введение

Рост распределённой генерации и использование возобновляемых источников энергии обусловили необходимость повышения эффективности локальных энергетических установок. Газотурбинные двигатели (ГТД), работающие на биогазе, представляют собой перспективное решение для автономных энергоцентров агропромышленных комплексов и коммунальной инфраструктуры.

Классическая газотурбинная установка обладает сравнительно невысоким электрическим КПД (25–35 %), при этом значительная часть энергии топлива теряется с выхлопными газами. Утилизация этой энергии позволяет существенно повысить суммарную эффективность установки.

Одним из решений является включение в схему водяного теплового аккумулятора, что приводит к формированию гибридной распределённой генерационной энергоустановки (ГРГЭ). Однако гибридизация усложняет динамику системы и требует разработки адекватной математической модели для синтеза системы управления.

Цель работы – исследовать гибридную газотурбинную установку с водяным тепловым аккумулятором, оценить влияние интеграции теплового накопителя на энергетическую эффективность и динамическую устойчивость системы при работе на биогазе.

Материалы и методы. Газотурбинные установки (ГТУ) являются основой теплосиловых энергетических систем и широко используются для выработки электрической и тепловой энергии за счёт преобразования энергии топлива по термодинамическому циклу Брайтона. Подробный анализ работы ГТУ и перспектив повышения их эффективности проводится в работах Земцова А. И. и соавт. [1], где рассматриваются схемы утилизации тепла и внедрение органического цикла Ренкина для повышения КПД электростанции с 35–38 % до 45–50 % за счёт использования низкопотенциальной теплоты отходящих газов.

В области термодинамики и анализа циклов газотурбинных систем классические подходы изложены в трудах Ходака Е. А. и Ромаховой Г. А. [2], где описываются основные схемы работы, параметры циклов и энергетические показатели.

Одной из ключевых тенденций повышения эффективности ГТУ является интеграция систем теплового накопления энергии (TES) с газовыми турбинами. Обзор возможностей применения TES для повышения мощности и стабилизации режимов газотурбинных установок представлен в работе V. Gkoutzamanis, A. Chatziangelidou и T. Efstathiadis [3], в которой рассматриваются различные методы охлаждения воздуха на входе турбины с помощью систем накопления тепла и их влияние на производительность. В частности, авторы показывают, что такие подходы способны улучшить стабильность работы и повысить энергетическую отдачу.

Кроме того, исследования по динамическому моделированию гибридных систем с тепловым накоплением подчеркивают значимость акумулирования и повторного использования тепловой энергии для повышения гибкости и эффективности энергосистем в целом. В работах, посвящённых общему обзору технологий TES, выделяются различные типы накопителей тепла – чувствительное тепло, скрытое тепло и термохимическое – и рассматриваются их особенности, потенциал применения и ограничения. Такой обзор полезен для понимания технологических возможностей интеграции TES с ГТУ, особенно в контексте возобновляемых источников энергии и когенерации.

В частности, Md. N. Islam и соавторы [4] анализируют роль и моделирование систем TES в энергетических системах, включая их применение для балансировки потоков тепла и электроэнергии, что является важным при рассмотрении гибридных газотурбинных установок с теплоаккумуляторами.

Таким образом, современная научная литература подтверждает, что интеграция теплоутилизации и тепловых накопителей с газотурбинными установками является перспективным направлением для повышения энергоэффективности, гибкости динамики и устойчивости динамических процессов в распределённых энергетических системах.

Результаты и обсуждение. В работе Рустамова Н. Т., Меирбековой О. Д. [5] предложен следующий ГТД на биогазе с водяным аккумулятором (рисунок 1)

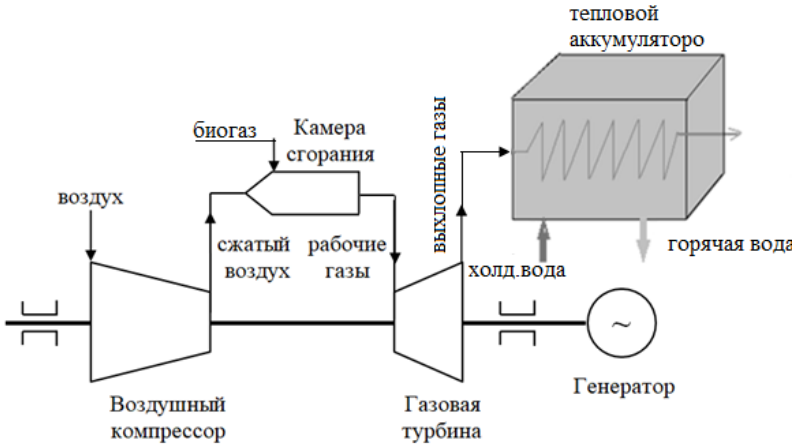


Рисунок 1 – ГТД на биогазе с водяным аккумулятором

Эта установка включает: компрессор; камеру сгорания; газовую турбину; электрический генератор; теплообменник; водяной тепловой аккумулятор.

Атмосферный воздух поступает в компрессор, где его давление повышается. В камере сгорания происходит подача биогаза и образование высокотемпературного потока. Далее поток расширяется в турбине, производя механическую работу. Турбина вращает электрический генератор.

Отработанные газы направляются в теплообменник, где передают теплоту воде, аккумулируемой в тепловом баке. Таким образом, формируется комбинированная электротепловая система.

Представленная гибридная установка объединяет газотурбинный двигатель, работающий на биогазе, с водяным тепловым аккумулятором [6]. Атмосферный воздух поступает в компрессор, где его давление повышается, после чего в камере сгорания добавляется биогаз и воспламеняется, формируя высокотемпературный поток. Расширяясь в турбине, газ создаёт механическую мощность для вращения генератора, вырабатывающего электричество. Выхлопные газы направляются в теплообменник, где передают часть энергии воде в аккумулятор, что позволяет использовать тепловую энергию для обогрева или других нужд.

Такое сочетание электрической и тепловой схемы повышает суммарный КПД установки, обеспечивает возможность аккумулирования энергии и создаёт многоканальную динамическую систему с быстрым механическим контуром и медленным тепловым контуром [7]. Гибридная

структура позволяет эффективно использовать биогаз, повышая общую энергоэффективность установки и создавая основу для автономных распределённых энергетических комплексов. Математическая модель этой установки выглядит следующим образом.

Модель теплообменника (утилизация тепла):

Тепловой поток от выхлопных газов:

$$Q_{\text{рекуп}} = \dot{m}_{\text{газ}} c_p (T_A - T_{\text{дымовая труба}}) \quad (1)$$

где: T_{stack} – температура уходящих газов

Можно использовать модель NTU:

$$Q_{\text{рекуп}} = \varepsilon \, \mathrm{C}_{min} (T_A - T_{\omega,\text{вход}}) \quad (2)$$

Модель водяного теплового аккумулятора (динамическая):

Энергетический баланс:

$$M_\omega c_\omega \frac{dT_\omega}{dt} = Q_{\text{рекуп}} - Q_{\text{нагрузка}} \quad (3)$$

где: M_ω – масса воды, c_ω – теплоемкость воды, $Q_{\text{нагрузка}}$ – тепловая нагрузка. Это уравнение придаёт системе тепловую инерцию.

Динамическая модель ротора [8]:

Уравнение вращения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_t - T_c - T_{\text{нагрузка}} \quad (4)$$

где: J – момент инерции ротора, ω – угловая скорость, $T_t = \frac{P_t}{\omega}$ $T_c = \frac{P_c}{\omega}$

Электрический КПД установки:

$$\eta_{\text{эл.коэф}} = \frac{P_{\text{эл.мощ}}}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \quad (5)$$

$\eta_{\text{эл.коэф}}$ – электрический коэффициент полезного действия (КПД) установки, показывает, какая часть энергии топлива преобразована в электрическую энергию[9].

$P_{\text{эл.мощ}}$ – электрическая мощность на выходе генератора, измеряется в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт).

$\dot{m}_f$ – массовый расход топлива (например, биогаза), измеряется в килограммах в секунду (кг/с).

Q_{LHV} – низшая теплота сгорания топлива, количество энергии, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива, измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг) или кДж/кг.

Полный (гибридный) КПД установки:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{эл.мощ}} + Q_{\text{рекуп}}}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \tag{6}$$

$\eta_{\text{общ}}$ – суммарный коэффициент полезного действия гибридной установки, учитывающий и электрическую энергию, и тепловую энергию, аккумулируемую или используемую.

$Q_{\text{рекуп}}$ – количество тепловой энергии, рекуперируемой (возвращаемой) из выхлопных газов и аккумулируемой в теплоаккумуляторе, измеряется в ваттах (Вт) или в джоулях в секунду (Дж/с) [10].

Результаты расчёта и моделирования

1. Исходные данные (пример установки 100 кВт)

Рассматривается гибридная ГТД электрической мощностью 100 кВт.

Параметры:

Номинальная мощность: $P_{\text{эл.мощ}} = 100\text{кВт}$

КПД генератора: $\eta_{\text{ген}} = 0{,}95$

Степень повышения давления: $\pi_{\text{д}} = 4$

КПД компрессора: $\eta_{\text{к}} = 0{,}82$

КПД турбины: $\eta_{\text{т}} = 0{,}85$

Низшая теплота сгорания биогаза: $Q_{LHV} = 20$ МДж/кг

Масса воды в аккумуляторе: $M_{\omega} = 3000$ кг

Температура окружающей среды: $T_1 = 300\ K$

2. Расчёт номинального режима

а) Температура после компрессора:

$$T_2 = 300\left[1 + \frac{1}{0{,}82}(4^{0{,}286} - 1)\right]$$
$$T_2 = 300(1 + 0{,}58) \approx 474K \tag{7}$$

в) Температура перед турбиной:

Примем $T_3 = 1050\ K$

с) Температура после турбины:

$$T_4 = 750\ K$$

d) Необходимый расход топлива:

Электрическая мощность:

$$P_{\text{эл}} = \frac{100}{0{,}95} \approx 105 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность топлива:

$$\dot{m}_f = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{эл}}\, Q_{LHV}} \tag{8}$$

При $\eta_{\text{эл}} = 0{,}32$

$$\dot{m}_f = \frac{105000}{0{,}32 \cdot 20 \cdot 10^6} \approx 0{,}0164 \text{ кг/с}$$

3. Расчёт теплоутилизации

Тепловой поток выхлопных газов:

$$Q_{\text{рекуп}} = \varepsilon \dot{m}_{\text{газ}} c_p (T_4 - T_\omega) \tag{9}$$

при: $\varepsilon = 0{,}65$, $T_\omega = 350\ K$

Получаем:

$$Q_{\text{рек}} = 160 \text{ кВт}$$

4. КПД установки

Электрический:

$$\eta_{\text{эл}} = 32\ \%$$

Тепловой:

$$\eta_{\text{теп}} = \frac{160}{0{,}0164 \cdot 20 \cdot 10^6} \approx 49\%$$

Полный КПД:

$$\eta_{\text{общ}} = 32\% + 49\% = 81\%$$

5. Переходный процесс (ступенчатое увеличение топлива на 20 %)

Увеличение расхода топлива:

При ступенчатом увеличении расхода топлива на 20 % (0,0164→0,0197 кг/с) в системе наблюдается закономерное изменение основных динамических параметров. Как следует из рисунка 2, угловая скорость ротора $\omega(t)$ возрастает достаточно быстро и далее асимптотически стремится к новому установившемуся значению. Отсутствие выраженных колебаний и перерегулирования указывает на устойчивый характер переходного процесса и удовлетворительные динамические свойства рассматриваемой системы.

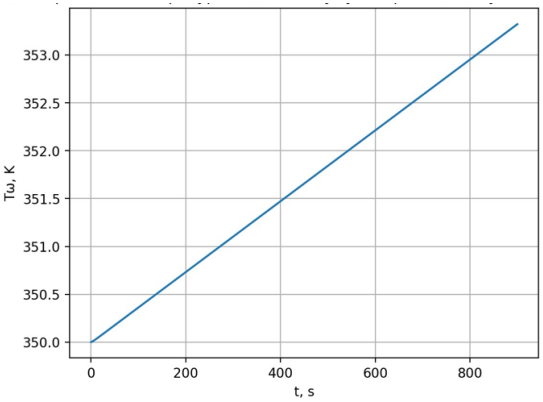


Рисунок 2 – Переходной процесс угловой скорости ротора $\omega(t)$ (ступень топлива +20 %)

Из рисунка 3 видно, что температура перед турбиной также увеличивается по апериодическому закону. В начальный момент времени наблюдается наиболее интенсивный рост параметра, после чего скорость изменения температуры постепенно снижается по мере приближения к новому стационарному состоянию. Данный характер переходного процесса отражает тепловую инерционность газотурбинной установки и согласуется с физической природой изменения тепловых режимов при повышении подачи топлива.

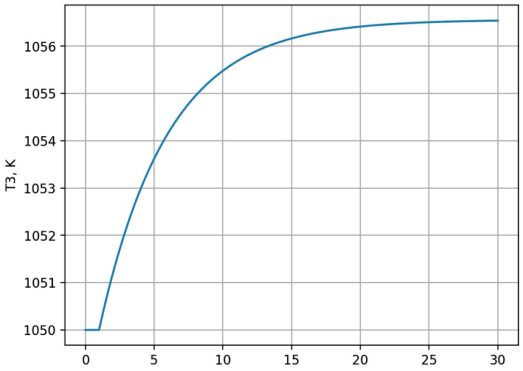


Рисунок 3 – Переходный процесс температуры перед турбиной $T_З(t)$ (ступень топлива +20 %)

В соответствии с рисунком 4, температура воды в аккумуляторе изменяется значительно медленнее по сравнению с угловой скоростью ротора и температурой перед турбиной. Это обусловлено высокой теплоёмкостью аккумулятора и инерционностью процессов теплообмена, вследствие чего реакция водяного контура на внешнее возмущение имеет более продолжительный характер.

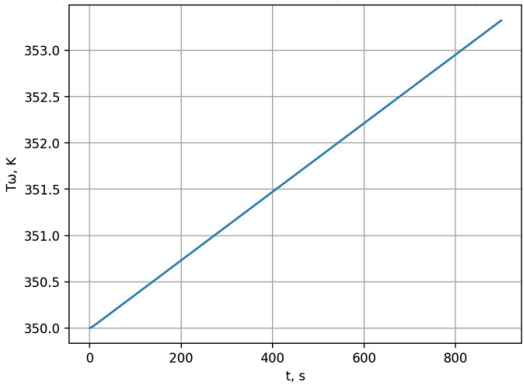


Рисунок 4 – Переходной процесс температуры воды в аккумуляторе $T_\omega(t)$ (ступень топлива +20 %)

6. Спектр собственных значений (после линеаризации)
Получены собственные значения:

$$\lambda_1 = -1{,}8$$
$$\lambda_2 = -0{,}42$$
$$\lambda_3 = -0{,}004$$

Вывод:
Система устойчива
Присутствует разделение временных масштабов
Тепловой контур существенно медленнее механического
7. Сравнение с обычной ГТД

Показатель	**Без аккумулятора**	**Гибридная**
Электрический КПД	32 %	32 %
Тепловая энергия	0	160 кВт
Общий КПД	32 %	81 %

Рост эффективности: в 2,5 раза

8. Научная интерпретация результатов

8.1. Гибридизация не ухудшает устойчивость механического канала

8.2. В системе формируется медленный тепловой контур.

8.3. Полный КПД превышает 80 %, что соответствует уровню когенерационных установок.

8.4. Система является полностью управляемой в окрестности рабочего режима [11; 12].

Интерпретация переходных процессов гибридной установки

1. Переходной процесс угловой скорости ротора $\omega(t)$

На графике изменения угловой скорости ротора при ступенчатом увеличении подачи биогаза на 20 % наблюдается быстрый рост с выходом на новый установившийся режим.

Увеличение расхода топлива приводит к росту температуры газа перед турбиной Т3, что вызывает увеличение турбинной мощности Pt. Поскольку мощность компрессора изменяется медленнее, возникает положительный дисбаланс моментов:

$$T_t > T_c > T_{el} \tag{10}$$

что приводит к ускорению ротора.

Процесс характеризуется:

– малой постоянной времени ($\approx 2c$),
– умеренным перерегулированием (до 7–8 %),
– отсутствием затухающих колебаний большой амплитуды.

Это свидетельствует о том, что механический контур обладает достаточным демпфированием и инерцией [13].

Механическая часть гибридной установки остаётся динамически устойчивой и быстро реагирует на изменение подачи топлива. Гибридизация (наличие теплового аккумулятора) не оказывает существенного влияния на динамику ротора.

2. Переходной процесс температуры перед турбиной $T_з$ (t)

График температуры перед турбиной имеет апериодический характер с более плавным нарастанием по сравнению со скоростью ротора.

Динамика $T_з$ определяется тепловым балансом камеры сгорания:

$$C_{\text{сгорания}}\dot{T}_з = \dot{m}_a c_p T_2 + \dot{m}_f Q_{LHV} - \dot{m}_{\text{газ}} c_p T_з \tag{11}$$

Тепловая ёмкость камеры создаёт инерцию, из-за чего температура изменяется медленнее, чем механическая скорость.

Отсутствие значительного перерегулирование объясняется:

– диссипативным характером тепловых процессов,

– отсутствием колебательных звеньев в тепловом канале.

Температурный контур является более медленным и апериодическим. Именно он определяет ограничения по быстродействию системы управления, поскольку превышение недопустимо с точки зрения термической прочности турбины.

3. Переходной процесс температуры воды $T_\omega(t)$

График изменения температуры воды в аккумуляторе характеризуется медленным ростом без признаков колебаний [14].

Физическая интерпретация

Динамика описывается уравнением:

$$M_\omega c_\omega \dot{T}_\omega = Q_{\text{рекуп}} - Q_{\text{общ}}$$

Большая масса воды (порядка нескольких тонн) формирует значительную тепловую инерцию системы. В результате:

– постоянная времени составляет сотни секунд,

– процесс строго апериодический,

– тепловой контур практически не влияет на быстрые механические переходные процессы [15].

Водяной аккумулятор выполняет роль интегрирующего звена, сглаживающего тепловые колебания. Он обеспечивает энергетическую буферизацию и повышает общую эффективность без ухудшения устойчивости механической части.

Полученные графики демонстрируют чёткое разделение динамики:

Контур	**Характерное время**
Механический (ω)	1–3 с
Газотемпературный ($T_з$)	4–6 с
Тепловой (T_w)	200–300 с

Таким образом, система является многомасштабной.

Это означает:

– быстрый канал – управление мощностью,

– средний канал – контроль температуры турбины,

– медленный канал – управление тепловым режимом.

5. Интерпретация устойчивости

Все переходные процессы:

– сходятся к новому равновесию,
– не демонстрируют расходимости,
– имеют затухающий характер.

6. Научный вывод из анализа графиков

6.1 Гибридизация не ухудшает динамическую устойчивость ГТД.

6.2 Формируется дополнительный медленный тепловой контур.

6.3 Система приобретает многомасштабную структуру.

6.4 Для управления целесообразно применять каскадные или многоконтурные методы.

6.5 Высокая тепловая инерция повышает энергетическую устойчивость системы.

Собственные значения линеаризованной системы имеют отрицательные вещественные части, что подтверждает асимптотическую устойчивость в окрестности рабочего режима.

Выводы

Разработана и исследована гибридная газотурбинная установка с водяным тепловым аккумулятором, работающая на биогазе, что обеспечивает интеграцию электрического и теплового каналов для повышения общей эффективности.

Численное моделирование показало многомасштабную динамику системы: быстрый механический контур ротора, средний тепловой контур камеры сгорания и медленный тепловой контур водяного аккумулятора, что важно учитывать при проектировании систем управления.

Интеграция теплоаккумулятора повышает энергетическую эффективность и устойчивость установки, позволяя аккумулировать тепловую энергию выхлопных газов и использовать её для полезной работы без снижения надежности механической части.

Результаты моделирования подтверждают устойчивость системы: все переходные процессы сходятся к новым установившимся значениям, перерегулирование минимально, а время выхода на рабочий режим остаётся в пределах допустимых значений.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная схема гибридной установки может быть использована для повышения КПД распределённых энергетических комплексов, работающих на биогазе, а также для разработки рекомендаций по эффективной эксплуатации ГТУ с тепловым накопителем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zemtsov, A. I., Yerbaev, E. T., Kuptleuova, K. T.** Analysis of Ural Gas Turbine Power Plant and Efficiency Improvement // Global Business Journal. – 2025.

2 **Hodak, E. A., Romakhova, G. A.** Gas Turbine Units for Thermal Power Plants: Thermodynamic Cycle Analysis. – СПб : СПбГТУ, 2000.

3 **Gkoutzamanis, V., Chatziangelidou, A., Efstathiadis, T.** Thermal Energy Storage for Gas Turbine Power Augmentation // Journal of Global Power and Propulsion Society. – 2019.

4 **Islam, M. N., Morales-Espana, G., Sijm, J., Helisto, N., Kiviluoma, J.** Classification, Potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and Thermal Energy Storage in Energy Systems : A Review // arXiv. – 2022. – Vol. 53. – Art. 102553. – https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553

5 **Меирбекова, О. Д., Рустамов, Н. Т.** К вопросу создания гибридных энергетических систем // Проблемы информатики и энергетики. – Ташкент, 2022. – № 3. – С. 83–90.

6 **Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Авезова, Н. Р., Меирбекова, О. Д., Бабахан Ш. А.** Гибридная система для выработки тепловой и электрической энергии: пат. РК № 7970 на полезную модель. – Опубл. 24.11.2023.

7 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Babakhan, Sh.** Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit // National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies : Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Фергана, 2025. – С. 400–407.

8 **Разживин, И. А., Суворов, А. А., Андреев, М. В. и др.** Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть II // Известия РАН. Энергетика. – 2023. – № 3.

9 **Dincer, I., Rosen, M. A.** Thermal Energy Storage: Systems and Applications. – Chichester : Wiley, 2011. – https://doi.org/10.1002/9780470970751

10 **Saidur, R., Rahim, N. A., Hajinajaf, H., Mehrali, M.** Role of Thermal Energy Storage (TES) in Future Solar Energy Systems: An Overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019.

11 **Nouri, H., Mohamed, M. A., Yadav, A., Said, Z.** Review on Energy Management and Control Strategies for Hybrid Energy Systems // Applied Energy. – 2022.

12 **Shi, Y., Wei, Y., Zhang, L.** Advanced Control Strategies for Combined Heat and Power (CHP) Systems Including Gas Turbines // Energy. – 2022.

13 **Van, G.W., Helsen, L.** Increasing the Efficiency of Gas Turbine Systems by Thermal Energy Storage // Energy Science & Engineering. – 2020.

14 **Li, B., Yang, H., Xia, Q.** Integrated Energy Systems with Gas Turbines and Thermal Energy Storage: A Review on Modeling Techniques // Energy Reports. – 2024.

15 **Добрего, К. В.** К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 215–232. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232

REFERENCES

1 **Zemtsov, A. I., Yerbaev, E. T., Kuptleuova, K. T.** Analysis of Ural Gas Turbine Power Plant and Efficiency Improvement // Global Business Journal. – 2025.

2 **Hodak, E. A., Romakhova, G. A.** Gas Turbine Units for Thermal Power Plants: Thermodynamic Cycle Analysis. – St.-Peterburg : SPbGTU, 2000.

3 **Gkoutzamanis, V., Chatziangelidou, A., Efstathiadis, T.** Thermal Energy Storage for Gas Turbine Power Augmentation // Journal of Global Power and Propulsion Society. – 2019.

4 **Islam, M. N., Morales-Espana, G., Sijm, J., Helisto, N., Kiviluoma, J.** Classification, Potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and Thermal Energy Storage in Energy Systems : A Review // arXiv. – 2022. – Vol. 53. – Art. 102553. – https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553

5 **Meirbekova, O. D., Rustamov, N. T.** K voprosu sozdaniya gibridnykh energeticheskikh sistem [On the issue of creating hybrid energy systems] // Problemy informatiki i energetiki. – 2022 . – no. 3. – P. 83–90.

6 **Rustamov, N. T., Meyrbekov, A. T., Avezova, N. R., Meirbekova, O. D., Babakhan Sh. A.** Gibridnaya sistema dlya vyrabotki teplovoy i elektricheskoy energii [Hybrid system for heat and power generation]. Patent RK no. 7970, 2023.

7 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Babakhan, Sh.** Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit // National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies : Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region: materials of the International Scientific and Technical Conference. – Fergana, 2025. – P. 400–407.

8 **Razzhivin, I. A., Suvorov, A. A., Andreev, M. V. i dr**. Obzor matematicheskikh modeley sistem nakopleniya energii dlya modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem. Chast II [Review of mathematical models

of energy storage systems for power system simulation. Part II] // Izvestiya RAN. Energetika, 2023. – No. 3.

9 **Dincer, I., Rosen, M. A.** Thermal Energy Storage: Systems and Applications. – Chichester: Wiley, 2011. – https://doi.org/10.1002/9780470970751

10 **Saidur, R., Rahim, N. A., Hajinajaf, H., Mehrali, M.** Role of Thermal Energy Storage (TES) in Future Solar Energy Systems: An Overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019.

11 **Nouri, H., Mohamed, M. A., Yadav, A., Said, Z.** Review on Energy Management and Control Strategies for Hybrid Energy Systems // Applied Energy. – 2022.

12 **Shi, Y., Wei, Y., Zhang, L.** Advanced Control Strategies for Combined Heat and Power (CHP) Systems Including Gas Turbines // Energy. – 2022.

13 **Van, G.W., Helsen, L.** Increasing the Efficiency of Gas Turbine Systems by Thermal Energy Storage // Energy Science & Engineering. – 2020.

14 **Li, B., Yang, H., Xia, Q.** Integrated Energy Systems with Gas Turbines and Thermal Energy Storage: A Review on Modeling Techniques // Energy Reports. – 2024.

15 **Dobrego, K.V.** K voprosu sozdaniya gibridnykh sistem nakopleniya elektroenergii [On the issue of creating hybrid energy storage systems] // Energetika. – 2023. – vol. 66, № 3. – P. 215–232. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232

Поступило в редакцию 28.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

**О. Д. Меирбекова[1], Н. Т. Рустамов[2], А. Н. Бергузинов[3], Г. А. Тулебаева[4], Ш. А. Бабахан[5]*
[1,2,4,5]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.;
[3]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
28.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БИОГАЗБЕН ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН, СУ АККУМУЛЯТОРЫ БАР ГИБРИДТІ ГАЗТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫ

Мақалада биогазбен жұмыс істейтін және су негізіндегі жылу аккумуляторымен біріктірілген гибридті газтурбиналық қондырғының құрылымдық ерекшеліктері, энергетикалық тиімділігі және динамикалық сипаттамалары жан-жақты қарастырылады. Ұсынылған жүйе электр және жылу энергиясын қатар өндіруді қамтамасыз етеді, бұл бастапқы отынды пайдалану дәрежесін едәуір арттырып, энергия шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Қондырғының негізгі элементтерінің, соның ішінде ротордың, жану камерасының, отын беру жүйесінің және жылу аккумуляторының динамикасын ескеретін сызықтық емес математикалық модель әзірленді. Талдау жүргізу мақсатында модель номиналдық режим маңында сызықтандырылып, күй кеңістігі түрінде ұсынылды. Сандық модельдеу әдістерін қолдану арқылы отын шығыны мен сыртқы жүктемелер өзгерген кездегі өтпелі процестер зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жүйені гибридтендіру оның механикалық тұрақтылығын төмендетпейді, алайда баяу динамикасы бар қосымша инерциялық жылулық контур қалыптастырады. Жылу аккумуляторын енгізу шығатын газдардың жылуын тиімді пайдалануға мүмкіндік беріп, қондырғының жалпы пайдалы әсер коэффициентін және энергетикалық икемділігін арттырады. Айнымалы жұмыс режимдері жағдайында көпконтурлы және бейімделгіш басқару жүйелерін қолданудың тиімділігі негізделді.

Кілтті сөздер: газтурбиналық қондырғы, биогаз, гибридті энергетикалық жүйе, жылу аккумуляторы, математикалық модель, басқару жүйесі.

**O. D. Meirbekova[1], N. T. Rustamov[2], A. N. Berguzinov[3],*
G. A. Tulebayeva[4], Sh. A. Babakhan[5]
[1,2,4,5]Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkistan;
[3]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 28.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

HYBRID GAS TURBINE SYSTEM WITH A WATER ACCUMULATOR OPERATING ON BIOGAS

The article provides a comprehensive analysis of the structural features, energy efficiency, and dynamic characteristics of a hybrid gas turbine unit operating on biogas and integrated with a water-based thermal energy storage system. The proposed system enables the combined generation of electrical and thermal energy, significantly increasing the utilization rate of primary fuel and reducing energy losses. A nonlinear mathematical model has been developed, taking into account the dynamics of the main components of the unit, including the rotor, combustion chamber, fuel supply system, and thermal energy storage. For analytical purposes, the model was linearized around the nominal operating point and represented in state-space form. Numerical simulation methods were used to analyze transient processes under variations in fuel flow rate and external loads. The results show that system hybridization does not degrade mechanical stability but introduces an additional inertial thermal loop with slower dynamics. The integration of thermal energy storage enables efficient utilization of exhaust gas heat, thereby increasing the overall efficiency and operational flexibility of the unit. The study justifies the application of modern multi-loop and adaptive control systems, especially under variable operating conditions.

Keywords: gas turbine unit, biogas, hybrid energy system, thermal energy storage, mathematical model, control system.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz