

МИНИ-ТЭЦ НА ОСНОВЕ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТОМАРОВ Г.В., д-р техн. наук, РАБЕНКО В.С., канд. техн. наук, БУДАНОВ В.А., инж.

Проведен сравнительный анализ существующих когенерационных энергоустановок с газопоршневыми, газотурбинными двигателями и топливными элементами. Сделаны выводы об областях рационального применения каждого типа мини-ТЭЦ.

Ключевые слова: когенерационная энергоустановка, первичный двигатель, коэффициент использования топлива, электрическая мощность, экологические показатели.

MINI CHP-S BASED ON COGENERATION TECHNOLOGIES

G. V. TOMAROV, Doctor of Engineering, V. S. RABENKO, Candidate of Engineering, V. A. BUDANOV, Engineer

A comparative analysis of cogeneration power stations with gas pistons, gas turbine engines and fuel cells is carried out. The authors identified rational operation areas for every mini CHP type.

Key words: cogeneration power plant, prime engine, fuel utilization factor, electric power, environmental parameters.

В настоящее время, в условиях практически монопольного производства электрической и тепловой энергии генерирующими компаниями РФ и неуклонного роста цен на энергоносители, в условиях конкурентной экономики со стороны малых и средних промышленных производителей возрос интерес к альтернативной энергетике (мини-ТЭЦ) на базе различных когенерационных энерготехнологий.

Следует подчеркнуть, что все сферы промышленного производства РФ, по сравнению с зарубежными промышленными производителями, как правило, малоэффективно используют низкопотенциальную энергию отходов технологических процессов. Стремление к конкурентоспособности подвигает как малые, так и крупные предприятия к утилизации низкопотенциальных источников энергии в целях энергосбережения. Этому способствуют все возрастающие требования к надежности и качеству энергоснабжения, а также стремление к независимости от монопольного рынка традиционной энергетике.

Следует полагать, что в ближайшие годы будет происходить интенсивное развитие и широкое внедрение когенерационных энергосберегающих технологий.

Двигатели когенерационных энергоустановок. Под когенерационной энергоустановкой (рис. 1) понимается мини-ТЭЦ малой и средней мощности для совместного производства теплоты и электроэнергии. В качестве двигателей в современных когенерационных установках применяются преимущественно поршневые двигатели внутреннего сгорания (ГПУ), газотурбинные двигатели (ГТУ), топливные элементы (ТЭ) [6, 7, 9].

Основными критериями выбора типа установки являются:

- единичная электрическая и тепловая мощность;
- удельная стоимость энергоустановки;
- моторесурс и надежность первичного двигателя;
- вид топлива;

- качество вырабатываемой электроэнергии;
- экономическая эффективность (конкурентоспособность);
- экологические характеристики;
- возможность работы в энергосистеме;
- особенности и ограничения применения;
- принцип действия и устройство когенерационных энергоустановок;
- стоимость сервисного обслуживания;
- простота обслуживания.

Мини-ТЭЦ на базе ГТУ. Первичным двигателем в мини-ТЭЦ на базе ГТУ является газовая турбина. Принцип работы ГТУ состоит в следующем.

Воздух, нагнетаемый в камеру сгорания компрессором, смешивается с топливным газом, формируя топливную смесь, которая и поджигается. Образующиеся продукты горения с высокой температурой (900–1200 °С) проходят через несколько рядов лопаток, установленных на валу газовой турбины, и приводят к вращению ротор ГТУ.

Механическая энергия передается электрическому генератору, соединенному с турбиной. Теплота отработавших в турбине газов используется в теплоутилизаторе для повышения эффективности установки.

Мини-ТЭЦ на базе ГПУ. Первичным двигателем в мини-ТЭЦ на базе ГПУ является поршневой двигатель – двигатель внутреннего сгорания (ДВС). В настоящее время используется два типа поршневых двигателей: с искровым зажиганием (бензиновые) и с воспламенением от сжатия (дизельные). Последние могут работать на дизельном топливе или природном газе с добавлением 5 % дизельного топлива для обеспечения воспламенения топливной смеси. Двигатели с искровым зажиганием могут работать на чистом газе (природный газ, биогаз и другие условно бесплатные газы).

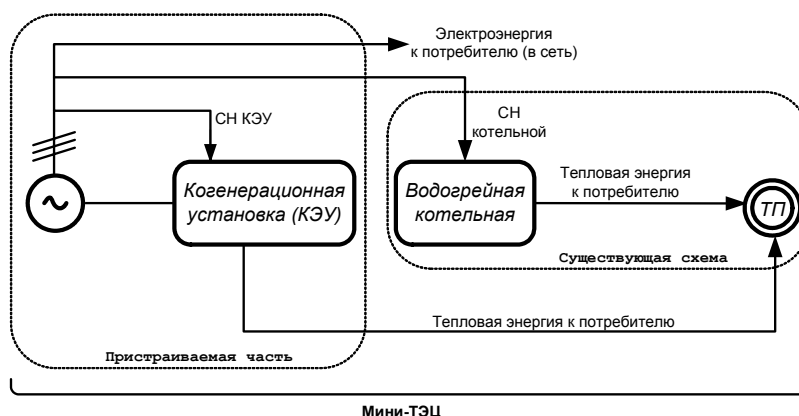


Рис. 1. Принципиальная схема построения когенерационной установки на основе существующего энергетического объекта малой энергетики (водогрейной котельной)

Мини-ТЭЦ на базе ТЭ. Топливные элементы (ТЭ) могут выступать как в качестве самостоятельного первичного двигателя, непосредственно вырабатывающего электрическую энергию, так и в составе гибридной энергетической установки, являясь, например, надстройкой для ГТУ (ПГУ). Принцип действия высокотемпературного модуля топливных ячеек состоит в следующем. Анод и катод внутри модуля разделяются мембраной. При поступлении водорода на анод и кислорода на катод начинается химическая реакция. Мембрана между анодом и катодом состоит из электролита карбоната. Ионы карбоната (CO_3^{2-}) проходят через мембрану и достигают анода, где свободный атом кислорода соединяется с водородом, превращаясь в воду, стекающую вниз. Параллельно образуются углекислый газ и два свободных электрона. Электроны движутся по проводнику к катоду, генерируя электрический ток. Таким же образом оставшиеся молекулы CO_2 поступают на катод, где абсорбируются свободные электроны и атом кислорода из воздуха. Затем углекислый газ участвует в реакции в качестве ионов карбоната. Рабочая температура в модуле составляет около 650°C .

Эффективность когенерационных энергоустановок. Эффективность когенерационных энергоустановок определяется экономичностью первичного двигателя и системы утилизации тепла (табл. 1). Полная эффективность когенерационной энергоустановки определяется коэффициентом использования топлива

$$\eta_{ИТ} = \frac{N_{эл} + Q_{ТЭ}}{Q_H^p V_{топл}}, \quad (1)$$

где $N_{эл}$ – электрическая мощность когенерационной установки, кВт; $Q_{ТЭ}$ – тепловая мощность когенерационной установки, кВт; Q_H^p – удельная низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $V_{топл}$ – расход топлива, кг/с.

Эффективность первичного двигателя для ГТУ и ГТА характеризуется эффективным КПД двигателя

$$\eta_{эф} = \frac{N_{мех}}{Q_H^p V_{топл}}, \quad (2)$$

где $N_{мех}$ – механическая мощность, развиваемая на валу двигателя, кВт.

Топливный элемент непосредственно преобразует электрохимическую энергию топлива в электрическую, поэтому его эффективность характеризуется электрическим КПД

$$\eta_{эл} = \frac{N_{эл}}{Q_H^p V_{топл}}, \quad (3)$$

где $N_{эл}$ – электрическая мощность, развиваемая топливным элементом, кВт.

Эффективный КПД ГТУ составляет 25–35 %, в зависимости от параметров работы конкретной модели турбины и характеристик топлива [4]. У ГПА эффективный КПД больше, чем у ГТА, и находится в диапазоне 40–45 %. ГПА эффективнее газовых турбин при малой нагрузке (от 30 % до 100 %). Самый большой электрический КПД первичного двигателя у установок на основе ТЭ – 50–55 %.

Таблица 1. Эффективность когенерационных энергоустановок

Характеристики эффективности установки	Мини-ТЭЦ на базе ГТУ	Мини-ТЭЦ на базе ГПУ	Мини-ТЭЦ на базе ТЭ
Эффективный (электрический) КПД первичного двигателя, %	25–35	40–45	50–55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70–92	до 95
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г.у.т./кВт·ч	300–615	360–610	210–340

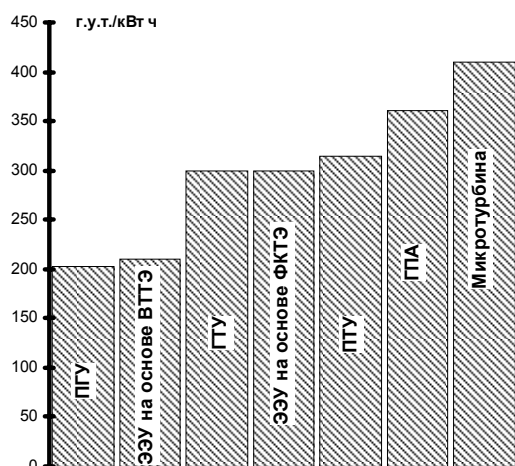


Рис. 2. Сравнение различных типов первичных двигателей по эффективности (без учета утилизации тепла): ФКТЭ – топливный элемент с фосфорноокислым электролитом; ВТТЭ – высокотемпературный топливный элемент

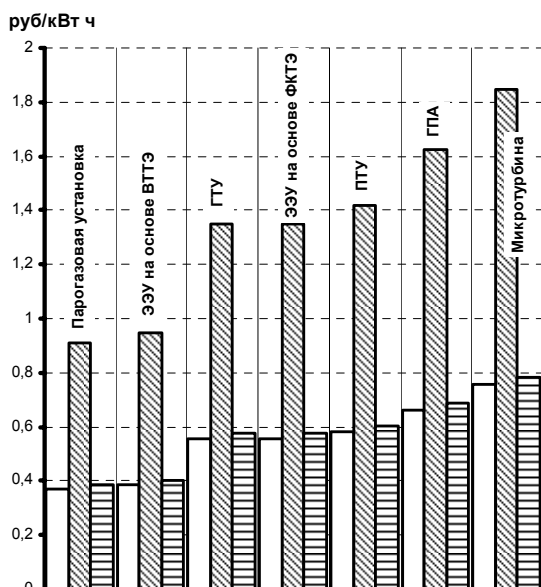


Рис. 3. Сравнение себестоимости вырабатываемой электроэнергии без учета утилизации тепла различных типов энергоустановок: □ – себестоимость 1 кВт·ч при цене на газ 45\$ за 1000 м³; ▨ – себестоимость 1 кВт·ч при цене на газ 110\$ за 1000 м³; ▩ – себестоимость 1 кВт·ч при цене на уголь 740 руб. за 1 т

При работе по когенерационному циклу коэффициент использования топлива для энергоустановок с ГТУ может достигать 90 %. У когенерационных установок на основе ГПА коэффициент использования топлива лежит в диапазоне 70–92 %.

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (рис. 2, 3) без учета утилизации тепла [1], г у.т./кВт·ч: а) для ГПА–360–610; б) для ГТУ–300–615; в) для ТЭ–210–340.

Единичная электрическая и тепловая мощность когенерационных энергоустановок и их соотношение. Единичная мощность

первичного двигателя: а) ГТУ – 0,25–300 МВт; б) ГПА с воспламенением от сжатия – 0,2–80 МВт; в) ГПА с воспламенением от искры – 0,003–8 МВт. Для ГПА характерна широкая линейка выходных мощностей до 3 МВт.

Нижняя граница электрической мощности, при которой работа ТЭЦ на базе газовых моторов представляется целесообразной, составляет модульную величину около 5 кВт_{эл}, а на базе газовых турбин – 500 кВт_{эл}.

Газопоршневой когенератор, начиная с 5 МВт и выше, могут предложить все меньшее количество заводов-изготовителей. Мощность единичной установки на ТЭ, в зависимости от типа элементов, приближается к 11 МВт [1]. Однако следует отметить, что на рынке пока есть всего лишь несколько моделей коммерческих энергоустановок. Одной из самых эффективных коммерческих моделей в настоящее время является топливный элемент «PC25 Model C» (типа ФКТЭ), производимый компанией United Technologies, мощностью 200 кВт [9].

По данным [2], соотношение мощностей *тепловая – электрическая* имеет достаточно широкий диапазон для когенерационных энергоустановок различных производителей: а) для мини-ТЭЦ с ГТУ – 1,5:1–5:1; б) для мини-ТЭЦ с ГПА – 0,5:1–3:1.

Стоимость когенерационных энергоустановок. Удельная стоимость киловатта установленной мощности когенерационных энергоустановок (рис. 4) (\$ США/кВт) согласно [3]: а) на основе ФКТЭ – 4100÷4500; б) с ГТУ – 1400; в) с ГПА – 900 [3].

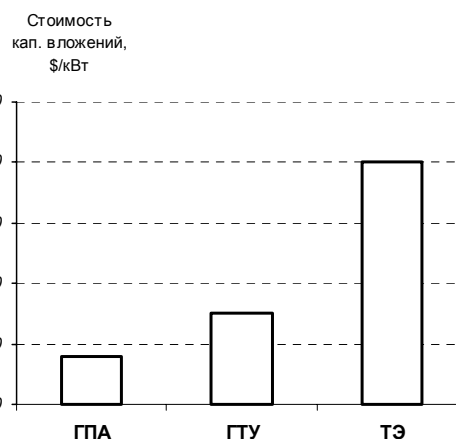


Рис. 4. Сравнение различных типов когенерационных установок по капитальным затратам

Ресурс и надежность первичного двигателя. Из рассматриваемых первичных двигателей ТЭ, по принципу действия, имеют минимальное количество движущихся частей, что обеспечивает высокую их надежность по сравнению с ГТУ и ГПА (рис. 5).

Ресурс газовых турбин составляет, по данным [4], до 100 тыс. ч с уменьшением ресурса при уменьшении мощности турбины. Ресурс ГПА, по данным [4], составляет до 300 тыс. ч. Ресурс ТЭ, по данным [1], составляет 20–50 тыс. ч.

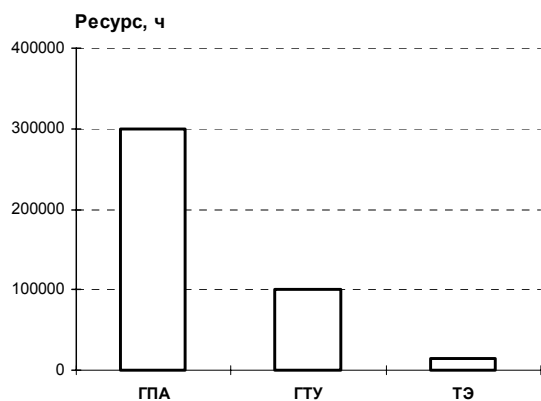


Рис. 5. Сравнение различных типов когенерационных установок по полному ресурсу

Экологические характеристики. Наибольшие выбросы оксидов серы делают газопоршневые когенерационные энергоустановки (ГПКЭ) – от 2 до 4 г/кВт·ч (рис. 6). Наименьшие выбросы оксидов серы характерны для когенерационных энергоустановок на основе ТЭ (КЭТЭ) – от 10^{-4} до 10^{-2} 4 г/кВт·ч. Наибольшие выбросы оксидов азота делают газотурбинные когенерационные энергоустановки (ГТКЭ) – от 5 до 30 г/кВт·ч, наименьшие – КЭТЭ: от 0,03 до 0,1 г/кВт·ч. Комплексно экологические характеристики энергоустановок оцениваются по суммарному приведенному выбросу с учетом экологической опасности каждого компонента выброса [1]. Наибольшие приведенные выбросы имеют ГПКЭ и ГТКЭ: 230–1430. Наименьшие – КЭТЭ: 2–5. У ГПКЭ дополнительно имеют место выбросы сажи и масла. Уровень шума у ГТКЭ самый высокий.

Выбросы загрязняющих веществ, г/кВтч

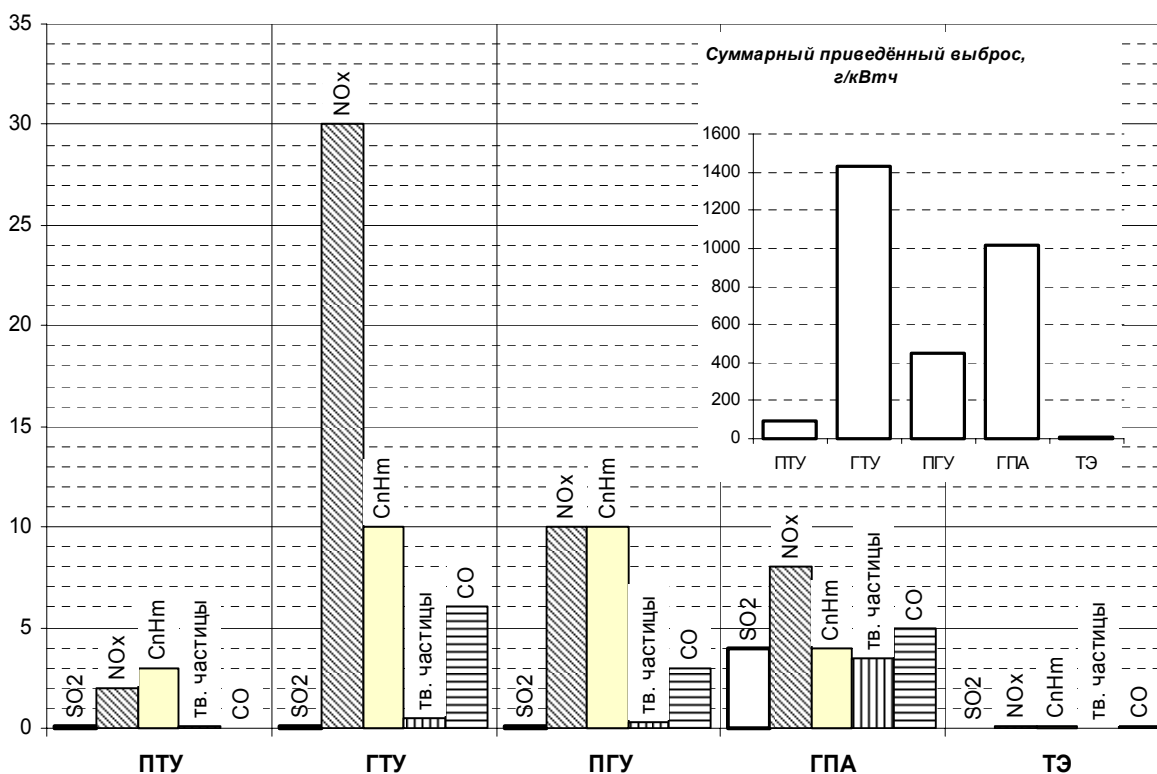


Рис. 6. Сравнение когенерационных энергоустановок по воздействиям на окружающую среду

Таблица 2. Сравнение когенерационных энергоустановок по воздействиям на окружающую среду [1]

Воздействие на окружающую среду	ПТКЭ	ГТКЭ	ПГКЭ	ГПКЭ	КЭТЭ
Выброс в атмосферу, г/кВт·ч:					
SO ₂	10 ⁻¹ -10 ⁻³	10 ⁻¹	10 ⁻¹	2-4	10 ⁻⁴ -10 ⁻²
NO _x	1-2	5-30	1-10	1-8	0,03-0,1
C _n H _n	1-3	0,5-10	0,5-10	2-4	10 ⁻¹ -10 ⁻²
CO	Следы	1-6	1-3	1-5	0,1
Твердых частиц	0,02-0,05	0,1-0,5	0,1-0,3	1-3,5	0-10 ⁻⁵
Суммарный приведенный выброс m _{пр}	40-90	230-1430	60-450	250-1020	2-5
Расход воды, м ³ /МВт·ч	110-160	10-15	50-80	-	-
Прочие воздействия	-	Шум (150-160 дБ)	Шум (100 дБ)	Выброс сажи и масла	-

Следовательно, КЭТЭ обладают наилучшими среди КЭ экологическими показателями (табл. 2).

Тип электрогенератора для КЭУ. Синхронный электрический генератор может работать как в автономном режиме, так и параллельно с сетью. Асинхронный генератор может работать только параллельно с сетью [8]. Поэтому для обеспечения гибкости применения распределенных когенерационных энергосистем чаще используют **синхронные** генераторы.

Особенности работы мини-ТЭЦ с ГТУ. Надстройка ГТУ котельных требует выполнение следующих общих условий:

- 1) оснащения ГТУ дожимающими компрессорами для обеспечения требуемого давления газа перед камерой сгорания (порядка 1–2 МПа);
- 2) обеспечения приемлемых экологических и шумовых характеристик работы ГТУ при размещении их вблизи жилой застройки;
- 3) возможности работы с противодавлением около 0,106 МПа с учетом аэродинамического сопротивления котлов-утилизаторов и газоходов, подающих уходящие газы ГТУ в топку котла через горелочные устройства.

Установка ГТУ в существующих котельных может быть осуществлена только в редких случаях по условиям генерального плана и компоновки оборудования. Наибольшие трудности при этом возникают при размещении на площадках действующих котельных дожимных газокompрессорных станций. Наличие зоны отчуждения по экологическим требованиям ограничивает их применение в зонах городской застройки. Некоторые конвертированные в энергетические авиационные и судовые ГТУ имеют собственную систему повышения давления топлива перед камерой сгорания, что необходимо учитывать.

Заключение

Проведенный анализ применимости ГПА, ГТУ и ТЭ для целей создания мини-ТЭЦ позволяет сделать следующие выводы.

Применение ГПА в составе мини-ТЭЦ может быть рационально в следующих случаях:

- на предприятиях, имеющих технологическую потребность в тепловой энергии в виде пара (до 10–12 бар и 180–200 °С) и горячей воды круглый год;
- предприятиях, имеющих технологическую потребность в холоде круглый год;
- в отопительных и промышленно-отопительных котельных для покрытия собственных нужд по электроэнергии и частично (полностью) тепловой нагрузки горячего водоснабжения;

- на газодобывающих предприятиях для использования остаточного низконапорного газа, который экономически невыгодно транспортировать, для выработки электроэнергии и тепла в районе добычи газа;
- предприятиях нефтедобывающей промышленности для утилизации попутного нефтяного газа;
- предприятиях угольной промышленности для утилизации шахтного газа, что позволяет избежать выброса метана в атмосферу и выработать электроэнергию и тепло в районе добычи угля;
- предприятиях, имеющих большое количество разнообразных биоотходов для их утилизации и выработки тепловой и электрической энергии. В этом случае часть тепловой энергии идет на нагрев отходов, что ускоряет производство биогаза;
- совместно с установками, в которых происходит дросселирование природного газа (турбодетандерной, ГРП и др.) для выработки электроэнергии и подогрева природного газа.

Применение мини-ТЭЦ с ГТУ может быть рационально в следующих случаях:

- при модернизации малой отопительной или промышленно-отопительной котельной с тепловой мощностью 50–180 Гкал/ч [5];
- на предприятиях, имеющих технологическую потребность в тепловой энергии круглый год и подвод газа высокого давления;
- при малых мощностях (20–450 кВт – микротурбины) для утилизации биоотходов животноводческих ферм и птицефабрик.

Когенерационные установки с ТЭ. Наиболее высокое качество вырабатываемой электрической энергии и экологические характеристики имеют энергоустановки на основе ТЭ. Высокие капитальные затраты за один киловатт установленной мощности (4000–5000 \$/кВт) при относительно небольшом заявленном их ресурсе (20000–50000 ч), а также небольшая мощность серийно выпускаемых ТЭ (до 200 кВт) сдерживают их широкое внедрение. Однако следует учесть, что производители ТЭ активно и успешно работают над увеличением ресурса и расширением коммерческой линейки мощностного ряда ТЭ, а прогнозируемое повышение цен на углеводородное топливо, при одновременном ужесточении экологических норм, делает КЭУ с ТЭ весьма привлекательными.

В настоящее время такие установки нашли ограниченное применение преимущественно для автономного энергоснабжения дач и коттеджей.

Список литературы

1. **Коровин Н.В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М.: Изд-во МЭИ, 2005.
2. **Когенерация** в мире / Сайт <http://www.cogeneration.ru>

3. Грицына В.П. Малые ТЭЦ. Газовые турбины или газовые двигатели // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2004. – № 7.

4. Вершинский В.П. Какой привод выбрать / Сайт: www.turbine-diesel.ru

5. Сафонов Л.П., Кругликов П.А., Смолкин Ю.В. Установка паровых турбин при реконструкции котельных // Теплоэнергетика. – 1996. – № 1. – С. 23–26.

6. Длугосельский В.И., Зубков В.Я. Надстройка водогрейных котельных газотурбинными установками // Теплоэнергетика. – 1999. – № 1. – С. 47–50.

7. Сеннова Е.В., Федяев А.В., Федяева О.Н. Эффективность развития малых ТЭЦ на базе газотурбинных и дизельных установок при газификации регионов // Теплоэнергетика. – 2000. – № 12. – С. 35–39.

8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

9. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Использование топливных элементов для энергоснабжения зданий. Ч. 1. // АВОК. – 2004. – № 2.

Томаров Григорий Валентинович,
Московский государственный открытый университет, ЗАО «ГеоИнКом»,
доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетических установок, генеральный директор,
e-mail: geotherm@gmail.com

Рабенко Владимир Степанович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин,
телефон (4932) 26-99-12,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Буданов Виталий Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры паровых и газовых турбин,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru