



Information Technologies, Mechanics and Optics: Refrigeration and Air Conditioning]. – 2018, № 1. – P. 47–56.

21. SP 300.1325800.2017 Sistemy struynoy ventilyatsii i dymoudaleniya podzemnykh i krytykh avtostoyanok. Pravila proektirovaniya [Systems of jet ventilation and smoke removal of underground and covered parking lots. Design rules] : utverzhd. i vved. v deystvie Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khoz-va RF ot 21 avgusta 2017 g. № 1145/pr : data vved. 22 fevralya 2018 g. – Moscow: Standartinform, 2017. – 63 p.

22. SP 2.13130.2020 Sistemy protivopozharnoy zaschity. Obespechenie ognestoykosti obektov zaschity [Fire protection systems. Ensuring fire resistance of protection objects] : utverzhd. i vved. v deystvie Prikazom Min-va RF po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy (MChS Rossii) ot 12 marta 2020 g. № 151 : vzamen SP 2.13130.2012 : data vved. 09 dekabrya 2020. – Moscow : MChS, 2020. – 45 p.

© А. М. Гримитлин, А. П. Волков, А. В. Свердлов, 2022

Получено: 27.12.2022 г.

УДК 621.182

**Е. А. ЛЕБЕДЕВА¹, канд. техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения;
М. А. РАЗИНА¹, магистрант кафедры теплогазоснабжения; В. А. ЯКОВЛЕВ²,
канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции**

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОТЕЛЬНЫХ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-45-35; эл. почта: evgelebedeva@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4. Тел.: (812) 575-05-31; эл. почта: yakovlevspb@rambler.ru

Ключевые слова: проектирование, расчет, когенерационные технологии, когенераторы, эффективность применения.

Рассмотрены особенности расчета и проектирования когенерационных технологий при реконструкции котельных в мини-ТЭЦ. Выявлены наиболее эффективные когенераторы применительно к паровым и водогрейным котельным. Приведены основы выбора и расчета электрогенерирующих установок, примеры реконструкции, показана эффективность когенерационных технологий.

Применение когенерационных технологий в паровых и водогрейных котельных позволяет эффективно дополнить рынок энергоснабжения. При этом решается проблема обеспечения потребителей теплотой и электроэнергией без дополнительного строительства новых линий электропередач и теплотрасс [1].

Паровая, или водогрейная котельная в результате проектирования электрогенерирующей установки на ее территории по своим функциям превращается в мини-ТЭЦ.

Проект использования когенерационных технологий в паровых и водогрейных котельных состоит из следующих этапов:



- выбор и обоснование типа электрогенерирующей установки;
- определение мощности электрогенерирующей установки и типа двигателя когенератора;
- корректировка тепловой схемы котельной с использованием теплоты, полученной в когенераторе;
- размещение электрогенерирующей установки в котельной;
- технико-экономическое обоснование когенерационной технологии.

Предварительное исследование преимуществ и недостатков различных типов когенерационных установок [2, 3] позволило осуществить оптимальный выбор схемы реконструкции котельных в мини-ТЭЦ: паровые котельные – когенерационная технология с паровыми турбинами; водогрейные котельные – использование газопоршневых двигателей или газотурбинных установок.

Рассмотрим возможность реконструкции паровой котельной, оснащенной 4 котлами ДЕ-16-14ГМ, в мини ТЭЦ.

Выбор типа электрогенерирующей установки определим путем термодинамического анализа противодавленческой и конденсационной турбин.

Тепловые процессы этих турбин сопоставления в T-S-диаграмме показаны на рис. 1.

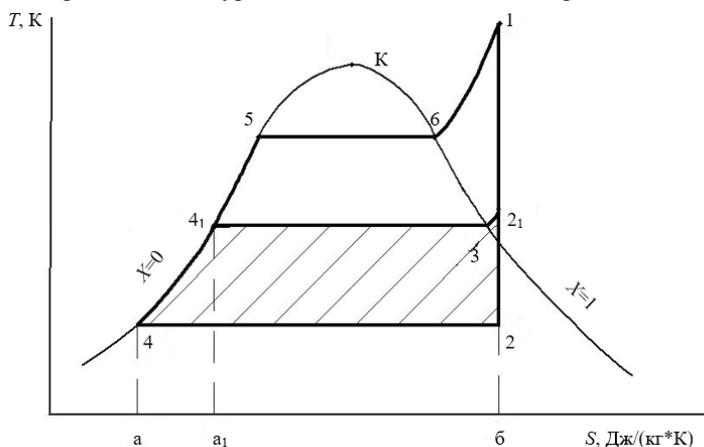


Рис. 1. Тепловые процессы в конденсационной турбине и турбине с противодавлением

Проанализируем цикл конденсационной турбины. Перегретый пар поступает в турбину, где происходит адиабатический процесс расширения пара (линия 1–2). Отработанный пар направляется в конденсатор, где создается вакуум. Конденсация пара происходит по изобаре (линия 2–4). Далее конденсат подается в паровой котел, где к воде подводится теплота: для нагрева воды до кипения (участок 4–5), парообразования (участок 5–6) и перегрева водяного пара (участок 6–1).

Цикл турбины с *противодавлением* отличается тем, что давление пара на выходе из турбины выше атмосферного (0,2–0,6 МПа), т. е. процесс отвода теплоты производится на более высоком температурном уровне $2_1 4_1$, чем в конденсационной турбине. То есть теплота, содержащаяся в отработанном паре, существенно выше (сопоставим площадь «а–4–4₁–3–2₁–б–а» и площадь «а–4–2–б–а»). Отличие конденсационной турбины в том, что теплота отработанного пара отводится к охлаждающей воде в конденсаторе и, как правило, теряется (слишком низкие температуры).

Анализ проектируемой мини ТЭЦ показал, что потребность в тепловой энер-

гии намного выше, чем в электрической. Это обусловило выбор противоаварийной турбины в составе когенерационной технологии реконструируемой котельной.

Кроме того, включение противоаварийной турбины параллельно паровой гребенке (см. рис. 2), предложенное в [2] позволило использовать сбросную энергию редукционной установки для получения практически бесплатной электроэнергии.

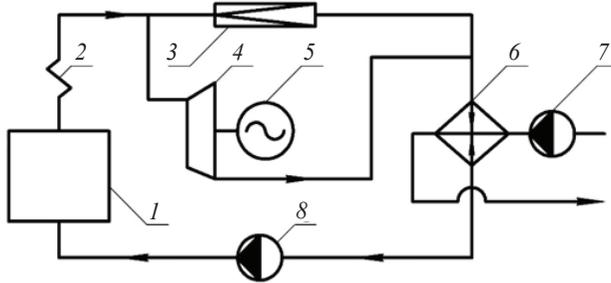


Рис. 2. Схема установки паровой турбины: 1 – паровой котел; 2 – пароперегреватель; 3 – редукционная установка; 4 – паровая турбина; 5 – электрогенератор; 6 – сетевой теплообменник; 7 – сетевой насос; 8 – питательный насос

Выбор когенерационной технологии для повышения энергоэффективности водогрейных котельных рассмотрим на примерах реконструкции водогрейной котельной с 3 котлами КВ-ГМ-20 и водогрейной котельной с 4 котлами *Viessmann 200-HWK*.

Выбор когенераторов в водогрейных котельных осуществляется путем сопоставления параметров газовых турбин и поршневых двигателей. Проанализируем преимущества и недостатки этих когенераторов.

На рис. 3 приведена схема газотурбинной установки (ГТУ).

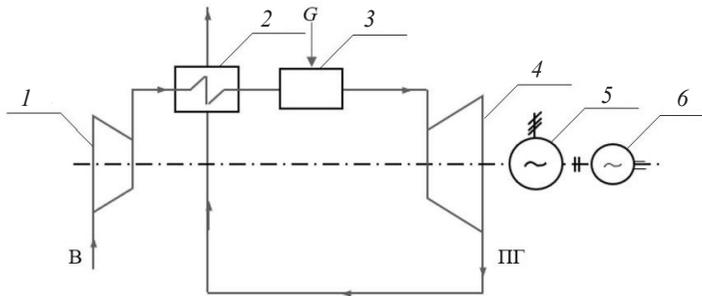


Рис. 3. Схема регенеративной ГТУ: 1 – компрессор; 2 – теплообменник; 3 – камера сгорания; 4 – газовая турбина; 5 – электрический генератор; 6 – пускатель; G – расход воздуха; B – расход топлива; ПГ – продукт сгорания

Газовая микротурбина имеет следующие преимущества по сравнению с поршневым двигателем:

- большой ресурс газотурбинной установки до капитального ремонта;
- меньший уровень эмиссии вредных веществ (NO_x – менее 50 мг/м^3);
- практически полностью отсутствует вибрация;
- существенно ниже эксплуатационные расходы (более чем в 2 раза);



– меньшие затраты на проектные, строительные и монтажные работы.

Однако газотурбинные установки имеют существенный недостаток – для газоснабжения турбины необходим высокий уровень давления природного газа.

Выбор поршневых двигателей определил тот факт, что котельная снабжается газовым топливом от газопровода среднего давления.

Анализ технических условий на газоснабжение рассматриваемой водогрейной котельной с 3 котлами КВ-ГМ-20 показал, что имеется возможность подключения реконструируемой котельной к газопроводу высокого давления. Это обусловило выбор оптимального когенератора – газовой турбины.

Далее произведено сопоставление двух схем газотурбинной установки (ГТУ): без регенерации и с регенерацией. Выбрана регенеративная ГТУ (см. рис. 4) как наиболее эффективная ввиду возможности использования отработанных в турбине продуктов сгорания для нагрева воздуха, подаваемого на горение.

Действительный термодинамический цикл ГТУ в диаграмме $H-S$ представлен на рис. 4, а результаты расчета параметров рабочих тел в расчетных точках термодинамического цикла приведены в табл. 1.

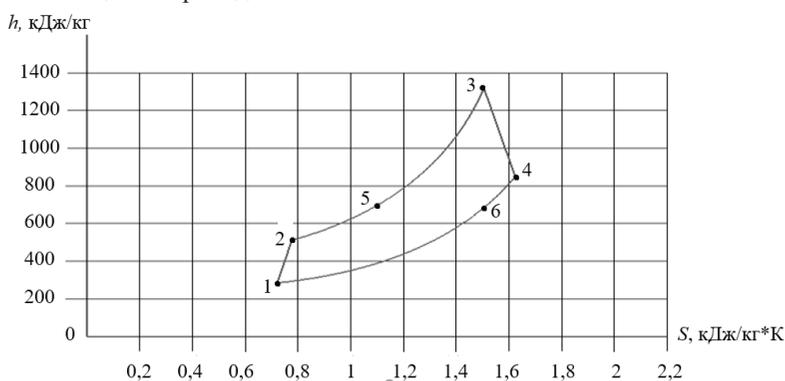


Рис. 4. Действительный цикл ГТУ с регенерацией теплоты в $H-S$ диаграмме

Таблица 1

Параметры рабочих тел газотурбинной установки

Точка	P , МПа	T , К	V , м ³ /кг	h , кДж/кг	S , кДж/кг*К
1	0,1	288,15	0,83	289,44	0,719
2	0,6	504,59	0,24	506,85	0,767
3	0,6	1089,15	0,58	1387,00	1,540
4	0,1	709,50	2,07	859,39	1,624
5	0,6	695,32	0,33	698,44	1,089
6	0,1	548,50	1,57	648,76	1,365

Далее рассмотрим выбор типа электрогенерирующей установки для водогрейной котельной с 4 котлами *Viessmann 200-HWK*.

Выбор газовых поршневых двигателей в составе электрогенерирующей установки определен отсутствием газопровода высокого давления, а также некоторыми преимуществами по сравнению с газотурбинными (устойчивость к снижению электрической нагрузки, меньший удельный расход топлива на кВт·ч электроэнергии, а также более высокий и постоянный электрический КПД).

Следующим этапом проекта реконструкции является определение расчетной мощности электрогенерирующей установки, которая складывается из потребно-

сти в электроэнергии оборудования котельной, освещения и др., а также внешних потребителей. Ниже приведены результаты расчета потребности в электрической энергии и выбора конструкций когенераторов применительно к рассмотренным ранее котельным:

– в паровой котельной с паровыми котлами ДЕ-16-14 расчетная мощность электрогенерирующей установки – 409,56 кВт; принят к установке паровой турбогенератор с противодавленческой турбиной ПТГ 0,5А/0,4 Р13/3,7;

– в водогрейной котельной с 3 котлами КВ-ГМ-10 необходимая мощность – 510 кВт; принят к установке газовый турбогенератор с микротурбиной *Capstone* С600 электрической мощностью 600 кВт;

– в водогрейной котельной с 4 котлами *Viessmann 200-HWK* расчетная мощность – 451,9 кВт, запроектирована электрогенерирующая установка с 2 газопоршневыми двигателями *CATERPILLAR G3412* электрической мощностью 280 кВт каждый.

Далее выполняется тепловой расчет двигателей в составе электрогенерирующих установок. Исходными данными для теплового расчета являются результаты приведенных ранее исследований идеальных и действительных термодинамических циклов двигателей.

Основной задачей теплового расчета когенераторов является определение расхода пара для турбины и расхода топлива для газовой турбины и газопоршневого двигателя, а также показателей эффективности процесса генерации электрической и тепловой энергии.

Следующим этапом проектирования является корректировка тепловой схемы котельных с учетом использования тепловой энергии, вырабатываемой турбогенераторами, в различных теплообменниках схемы.

В качестве примера на рис. 5 приведена схема использования теплоты, (1380 кВт), образующейся в системе охлаждения газопоршневых двигателей *CATERPILLAR G3412*, и теплоты выхлопных газов для нагрева подпиточной воды тепловой сети [3].

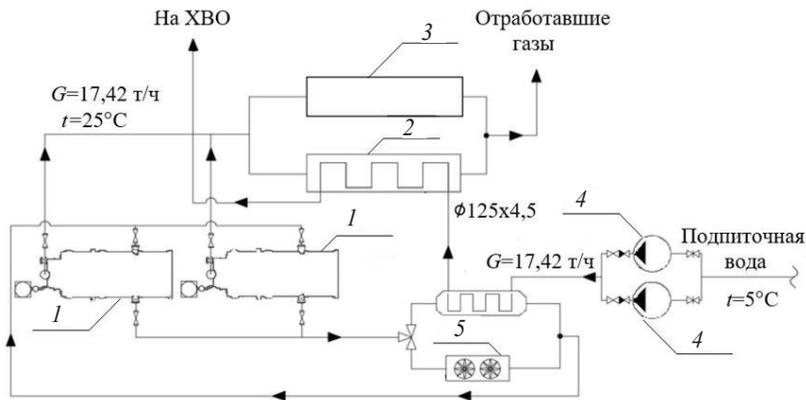


Рис. 5. Фрагмент тепловой схемы водогрейной котельной после реконструкции: 1 – поршневой двигатель; 2 – утилизатор; 3 – глушитель поршневого двигателя; 4 – подпиточные насосы; 5 – радиатор охлаждения

В паровых турбинах используется теплота отработанного пара давлением 0,3–0,6 Мпа для нагрева сетевой воды в паровой котельной; в газовых турбинах – те-

плота выхлопных газов для нагрева подпиточной или сетевой воды в котлах-утилизаторах. Кроме того, при реконструкции паровой котельной в мини ТЭЦ (для функционирования паровой турбины отбирается пар из действующего котла) необходимо доказать, что внедрение когенерации не потребует существенного увеличения количества котлов в котельной или их реконструкции. При реконструкции водогрейных котельных необходимо учесть дополнительный расход газового топлива для работы газовой турбины или газопоршневого двигателя.

Важным этапом проекта реконструкции котельной в мини ТЭЦ является выбор места размещения электрогенерирующей установки в реконструируемой котельной.

При установке электрогенераторов необходимо предусматривать возможность переключения вырабатываемой электроэнергии на собственные нужды во внешнюю электросеть и возможность использования на токоприемниках мини ТЭЦ внешнего источника электроснабжения.

Принятые в проекте реконструкции котельной в мини ТЭЦ технические решения должны обеспечить:

- надежность и безопасность работы вновь установленного оборудования для генерации электрической и тепловой энергии;
- требования охраны окружающей среды;
- требуемые санитарно-бытовые условия для эксплуатационного и ремонтного персонала. Поршневые двигатели и газовые микротурбины можно устанавливать непосредственно в помещении котельной, так как они, как правило, поступают полностью укомплектованными, размещаются в защитном кожухе и снабжены экозащитными устройствами.

Паровую турбину необходимо устанавливать в отдельном помещении (возможно, в пристройке к зданию котельной). Это обусловлено высокими уровнями шума и вибрации, создаваемых паровыми турбинами.

При размещении электрогенерирующего оборудования в отдельном помещении или в пристройке в машинном отделении должно быть не менее двух выходов, желательны расположенных в противоположных сторонах помещения.

На рис. 6 представлена схема размещения электрогенерирующей установки с паровой турбиной в помещении котельной.

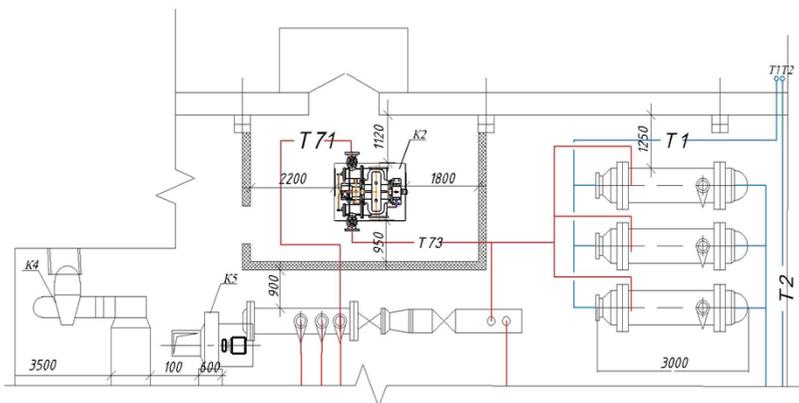


Рис. 6. Фрагмент плана котельной с установкой парового турбогенератора



Заключительным этапом проекта реконструкции котельной в мини ТЭЦ является расчет срока окупаемости когенерационных технологий.

Установлено, что минимальный срок окупаемости (1,5–1,7 года) имеет электрогенерирующая установка, в которой в качестве двигателя используется паровая турбина (т. к. отбирается сбросной пар редуцированной установки).

Сроки окупаемости газотурбинных и газопоршневых установок существенно выше (2,5–3,5 года), т. к. для производства электроэнергии в них необходимы затраты органического топлива. Однако эти сроки также существенно ниже нормируемых.

Таким образом, реконструкция котельных в мини ТЭЦ повышает энергоэффективность котельной и надежность работы электропотребляющего оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поливанов, В. И. Государственная политика в теплоэнергетике / В. И. Поливанов. – Текст : непосредственный // Коммунальный комплекс России. – 2013. – № 9. – С. 8–12.

2. Лебедева, Е. А. Анализ эффективности использования когенерационных технологий в котельных установках / Е. А. Лебедева. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – № 1. – С. 105–112.

3. Лебедева, Е. А. Перспективы использования когенерационных технологий в паровых и водогрейных котельных / Е. А. Лебедева, И. Г. Пищаскин, С. Ю. Дагаев. – Текст : непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений, (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2019. – С. 308–311.

LEBEDEVA Evgenia Andreevna¹, candidate of technical sciences, professor of the chair of heat and gas supply; RAZINA Maria Andreevna¹, undergraduate student of the chair of heat and gas supply; YAKOVLEV Viktor Aleksandrovich², candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heat and gas supply and ventilation

FEATURES OF CALCULATION AND DESIGN OF COGENERATION TECHNOLOGIES IN BOILER ROOMS

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 433-45-35;
e-mail: evgelebedeva@mail.ru

²Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
4, 2-nd Krasnoarmeyskaya St, St. Petersburg, 190005, Russia. Tel.: +7 (812) 575-05-31;
e-mail: yakovlevspb@rambler.ru

Key words: design, calculation, cogeneration technologies, cogenerators, application efficiency.

The features of calculation and design of cogeneration technologies during the reconstruction of boiler houses in mini-CHP are considered. The most efficient cogenerators are identified for steam and hot water boilers. The fundamentals for selection and calculation of power generating installations, examples of reconstruction are given, the effectiveness of cogeneration technologies is shown.



REFERENCES

1. Polivanov V. I. Gosudarstvennaya politika v teploenergetike [State policy in heat power engineering]. Kommunalny kompleks Rossii [Communal complex of Russia]. 2013. № 9. P. 8–12.
2. Lebedeva E. A. Analiz effektivnosti ispolzovaniya kogeneratsionnykh tekhnologiy v kotelykh ustanovkakh [Analysis of the efficiency of using cogeneration technologies in boiler plants]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2019, № 1. P. 105–112.
3. Lebedeva E. A., Pischaskin I. G., Dagaev S. Yu. Perspektivy ispolzovaniya kogeneratsionnykh tekhnologiy v parovykh i vodogreynykh kotelnykh [Prospects for the use of cogeneration technologies in steam and hot water boilers]. Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyаемые istochniki energii. Atomnaya energetika : materialy Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov I molodykh uchyoniykh, posvyaschyonnoy pamyati professor Danilova N. I. (1945-2015) – Danilovskikh chteniy (Ekaterinburg, 09-13 dekabrya 2019 g.). Ekaterinburg, UrFU, 2019. P. 308–311.

© Е. А. Лебедева, М. А. Разина, В. А. Яковлев, 2022

Получено: 21.12.2021 г.

УДК.662.76

С. В. БОЛДИН, канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения;
Н. Т. ПУЗИКОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В ГАЗОПОРШНЕВОЙ УСТАНОВКЕ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-45-35;
факс: (831) 430-19-46; эл. почта: e-mail: moralova@yandex.ru

Ключевые слова: генераторный газ, теплота сгорания, зона генерации, газопоршневая установка.

Представлен анализ данных экспериментов на газогенераторной установке. Выполнен анализ зависимости теплоты сгорания генераторного газа от температуры и расхода воды в зону генерации и анализ зависимости состава генераторного газа от температуры газа на выходе из газогенератора.

Для когенерации может использоваться широкий диапазон видов топлива, включая, например, отходы, возобновляемое топливо (биомасса), а также ископаемые виды топлива – уголь, нефть и природный газ.

Дешевым местным топливом могут быть отходы древесины, отходы сельхозпроизводства, бурый и каменный уголь. Выработка электроэнергии из такого топлива возможна при генерации горючего газа низкой калорийности в газогенераторе обращенного процесса с последующим использованием этого газа в газопоршневом двигателе, приводящем электрогенератор.

Слоевые газогенераторы на специально подготовленном топливе (высушенные чурки лиственных пород или древесный уголь) широко применялись как источники топлива как для транспортных двигателей, так и для стационарных двигателей внутреннего сгорания, приводящих электрогенератор. Низкая калорийность