

УДК 621.31; 621.438; 621.452.001.76:620.95

**Энергокомплексы на базе газотурбинных установок с использованием  
в качестве топлива бытовых отходов**

Эркабаева Е.О., Швецов И.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент КАЧАН С.А.

Специфическим топливным ресурсом современной цивилизации являются твердые бытовые отходы (ТБО), постоянно образуемые в результате жизнедеятельности человека, а также твердые промышленные отходы (ТПО) лесопромышленной, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности. Фактически ТБО и ТПО являются возобновляемым источником энергии.

В течение года житель города образует около 350 кг ТБО. Для города с миллионным населением это составляет 1 000 000 кг ТБО, образуемых ежедневно, которые необходимо регулярно удалять из жилой зоны города. Аналогичная ситуация имеет место с ТПО, которые также требуется регулярно удалять из промышленной зоны.

Используются два способа обращения с ТБО (ТПО) - это захоронение на специальных полигонах методом санитарной засыпки или сжигание. Естественный процесс гниения биомассы (медленное окисление) на полигоне или ее открытое сжигание (быстрый процесс окисления) являются собой одно и то же звено цепи круговорота веществ в природе. Захоронение на полигоне и последующее содержание полигона являются дорогим мероприятием, выводящим к тому же земли, занятые под полигон, из землепользования на 15...20 лет. Так, для окупаемости полигона стоимость размещения 1 т ТБО в США доходит до 80 долл/т. Примерно такая же стоимость размещения ТБО в Европе [1, 2].

При этом ТБО (ТПО) являются энергоемкими, и при их сжигании выделяется значительная теплота. По данным 1995 г. [1, 2] среднегодовой поэлементный состав ТБО Москвы следующий, %: углерод — 20,41, водород — 2,43, кислород — 15,75, азот — 0,49, сера — 0,15, зола, шлам — 18,77, влага — 41,8. Низшая теплота сгорания (по рабочей массе) составляет 6...7 МДж/кг. Для сравнения, теплота сгорания угля Райчинского месторождения 9,51 МДж/кг, горючих сланцев Капширского месторождения — 5,8 МДж/кг, торфа — 8...10 МДж/кг, древесины — 7,3...10 МДж/кг.

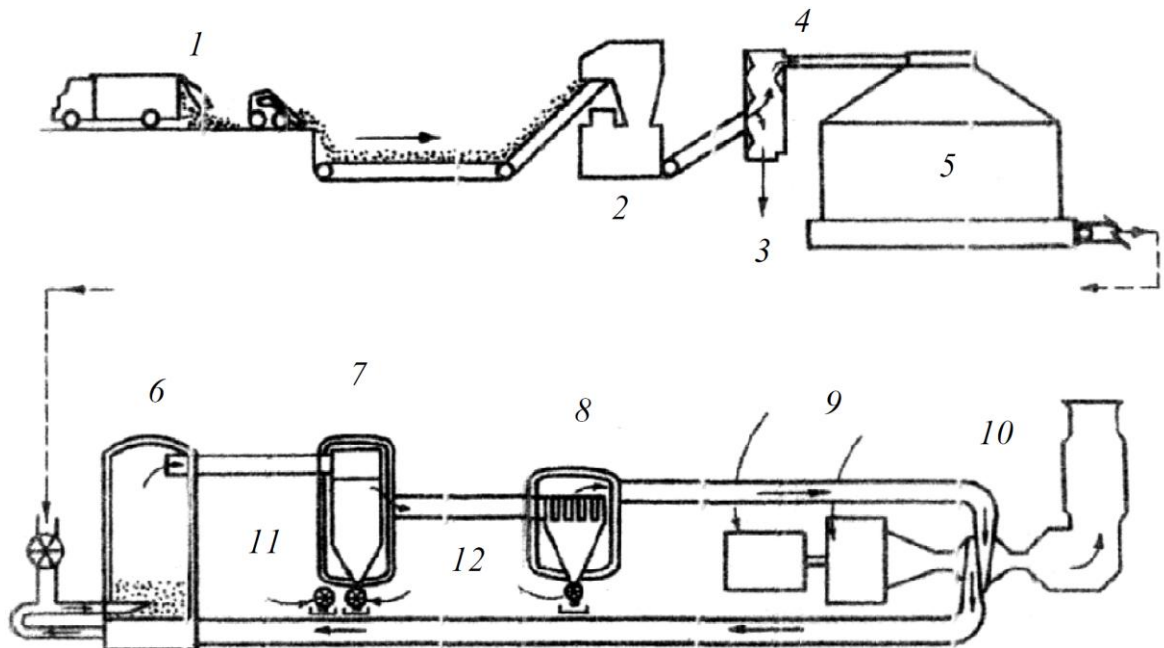
К тому же при управляемом процессе сжигания возможно полностью исключить или свести к минимуму выброс загрязняющих веществ в атмосферу.

Энергетически и экологически целесообразно выстроенный процесс термической переработки ТБО является практически единственным способом одновременного решения энергетической и экологической проблем XXI столетия.

Мусороперерабатывающие предприятия (мусоросжигающие заводы (МСЗ)) используются в разных странах более 60.. 100 лет, сначала как мусоросжигающие предприятия, а позднее как мусоросжигающие паротурбинные ТЭС большой мощности, производящие электричество и тепло. Так, во Франции действуют 134 МСЗ, их которых 60 большой производительности, размещенных в пригороде Парижа, покрывают более 80 % энергопотребления города [3].

Наряду с этим целесообразны экологически «чистые», автоматизированные мусороперерабатывающие энергокомплексы меньшей мощности, размещенные в пределах обслуживаемой территории, которые могут быть созданы на базе газотурбинных установок.

Примером может служить энерготехнологический комплекс CPU-400 (рисунок 1), разработанный по контракту с Национальным исследовательским центром США по охране окружающей среды. Комплекс предназначен для утилизации ТБО на муниципальной территории с населением 400 тыс. человек. Пилотный вариант производительностью 100 т/сут для территории с населением 150 тыс. человек был введен в опытную эксплуатацию в Калифорнии.



1 - двор доставки мусора; 2 - мельница; 3 - отсортированный негорючий материал; 4 - воздушный сепаратор; 5 - контейнер размолотого горючего мусора; 6 - топка с псевдокипящим слоем; 7 - сепаратор инерционного типа, сепарирующий золу и песок (1 ступень очистки); 8 - сепаратор инерционного типа, сепарирующий золу (2 ступень очистки); 9 - генератор; 10 - газовая турбина; 11 - песок; 12 - зола

Рисунок 1 – Принципиальная схема утилизирующего комплекса CPU -400

Технологический процесс обращения с ТБО включает три основных цикла:

- прием и первичная обработка ТБО с выделением горючей фракции и «отсеиванием» негорючих субстанций;
- полное сжигание горючей фракции с выработкой электроэнергии;
- разделение негорючей субстанции методом флотации на группы материалов, реализуемых как вторичное сырье.

Комплекс автоматизирован и может обслуживаться одним оператором.

Энергетическая часть установки состоит из топки с кипящим слоем, двух последовательно включенных в газовый тракт стационарных циклонов и ГТУ с электрогенератором. Воздух для наддува топки с кипящим слоем отбирается от последней ступени компрессора ГТУ. Топливо (горючие фракции ТБО) в топку по пневмотрассе подается из контейнера горючих фракций. Относительно низкая температура процесса сжигания не приводит к образованию оксидов азота термическим путем, а оксиды серы введением присадки выводятся в шлак. Чистота выхлопа допускает размещение CPU-400 в жилой зоне.

В перспективе такой проект может быть оборудован системой дистанционного сбора ТБО: «домовой мусоросборник»-«упаковка ТБО в капсулы», «пневматическая транспортировка от дома до комплекса первичной обработки ТБО».

Товарной продукцией CPU-400 являются электроэнергия и вторичное сырье. Вырабатываемая энергия покрывает около 15 % электропотребления обслуживаемой территории.

Энерготехнологический комплекс CPU-400 является полностью самокупаемой установкой в пределах рабочей площадки и даже приносящей прибыль порядка 20% (без учета налогообложения). А косвенно, с учетом исключения затрат на дальнейшее транспортирование и за размещение ТБО на полигоне (80 долл/т) энерготехнологический комплекс CPU-400 является экономически прибыльным предприятием.

Надежность, работоспособность и экономичность установки в значительной степени зависят от газотурбинного энергопреобразователя, газовая турбина которого работает на дымовых газах, генерированных в топке с кипящим слоем. После топки высоконагретые дымовые газы направляются в циклоны, где подвергаются инерционной очистке от выноса материалов кипящего слоя, зольных частиц и других твердых взвесей. Для предотвращения эрозионного повреждения лопаток турбины пылесодержание дымовых газов понижается до 5 мг/м при размере частиц не более 15 мкм. При высокой температуре работоспособность и надежность циклонов снижаются. Это не позволяет увеличить температуру газа на выходе из топки до температуры современной эффективной ГТУ. Кроме того, в циклонах и на протяженной трассе от топки до турбины происходят потери давления и расхолаживание продуктов сгорания.

Опыт создания и эксплуатации CPU-400 продемонстрировал эффективность использования газотурбинных установок при утилизации ТБО. Однако вследствие отмеченных выше и ряда других недостатков энергоустановки такого типа с прямым сжиганием ТБО дальнейшего развития не получили.

Работы сосредоточились на двухстадийном процессе термической переработке ТБО: сначала газификация с последующим улучшением потребительских свойств генераторного газа (фильтрация твердых взвесей, экстракция дегтя, смолы, масел, химическая обработка с подавлением окислов серы и подобных соединений), а затем сжигание в типовой камере сгорания ГТУ. Товарной продукцией является электроэнергия, тепло и (при наличии сортировальных устройств) вторичное сырье.

Возможно также разделение функций. На обслуживаемой территории производится только газификация ТБО с покрытием энергии на собственные нужды, а электро- и теплофикационная нагрузки покрываются отдельной ГТУ, работающей на генераторном газе производства данной установки [2].

К началу XXI столетия в Европе эксплуатировалось более 15 различных типов газогенераторов коммерческого уровня, работающих на паротурбинную установку. Большинство из них используется в сфере утилизации ТБО и ТПО.

Российская разработка газотурбинного комплекса утилизации ТБО (совместная работа Института проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ), ФГУП ММПП «Салют» и МГТУ им. Н.Э. Баумана) базировалась на использовании газогенератора разработки ИПХФ, позволяющего газифицировать любое твердое горючее, в том числе высокзолное и высоковлажное. Это газогенератор шахтного типа (рисунок 2) противоточной схемы с газификацией в плотном слое при атмосферном давлении с паровоздушным дутьем и твердым золоудалением.



Рисунок 2 – Газификатор в комплекте со сжигающим устройством на экспериментальной площадке ФГУП ММПП «Салют»

Особенность технологии - это использование высоко теплоемкостного инерта.

Инерт загружается вместе с ТБО и, проходя последовательно через зоны осушения, пиролиза, восстановления, газификации, охлаждения золы, выполняет функцию аккумулятора, переносящего из зоны в зону аккумулированную теплоту.

Это позволяет реализовать оптимальное по высоте реактора поле температур (рисунок 3) и довести КПД газификации до 95...96 %. Температура в зоне газификации превышает 1500 К, что позволяет газифицировать с обезвреживанием отходы медицинских учреждений. Генераторный газ от зоны реакции поднимается вверх.

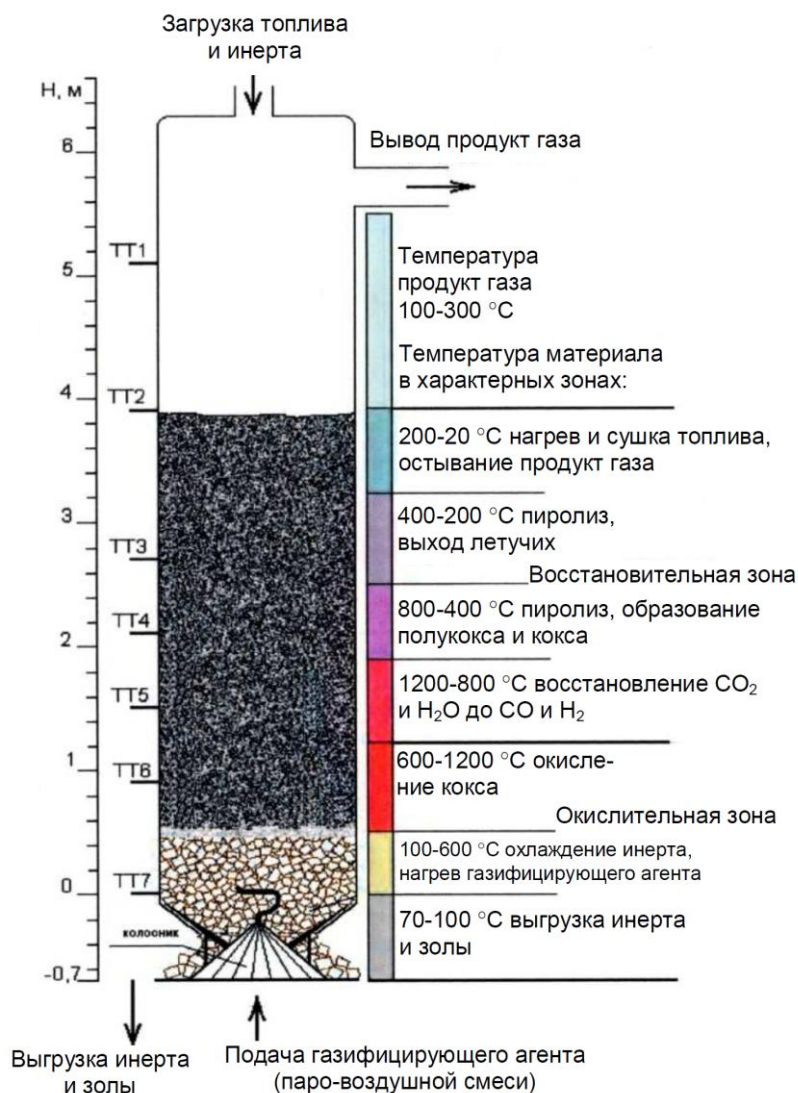


Рисунок 3 – Принципиальная схема газификатора

Проходя через плотные слои свежезагруженного сырья, высушивая его, генераторный газ охлаждается до 330...370 К. За счет эффекта фильтрации происходит первичная сепарация крупных пылевых фракций. Шлак, зола и инерт выводятся через нижний шлюз.

Газогенератор разрабатывался специально для газификации твердых бытовых отходов, но с успехом газифицирует другие виды твердого топлива, в том числе высокосольные с большим влагосодержанием, что является проблематичным для газификаторов с иной технологией газификации. Газификатор прошел экологическую экспертизу.

Аналогичный газификатор (первый образец) с 1998 г. эксплуатируется в г. Лаппеенранта (Финляндия) на производственной территории ОАО «Экогазтек».



Опытная эксплуатация газификатора показала, что при отсутствии специальных фильтров на выхлопе сжигательного устройства экологические показатели газификатора существенно лучше аналогичных показателей мусоросжигательных предприятий, оборудованных фильтрами на выхлопной трубе. Термический режим газификации с использованием высокотеплоемкостного инерта, восстановительной среды и отсутствие золы уноса в генераторном газе практически полностью изменяют условия первичного образования фуранов и диоксинов. Вследствие низкой температуры выхода генераторного газа в значительной степени исключается возможность попадания в генераторный газ возгонов тяжелых металлов.

Рассмотрим две схемы газотурбинного энергопреобразователя к газификатору ИПХФ.

Первая - регенеративная ГТУ традиционной схемы, работающая на генераторном газе, который предварительно прошел стадию подготовки (сухая или мокрая очистка от эрозионно-опасных твердозольных фракций, способных нанести повреждения лопаткам турбины [4]) и компремирован до давления впрыска в камеру сгорания ГТУ (на выходе из газификатора давление газа близко к атмосферному).

Для повышения удельной мощности и КПД ГТУ регенеративного цикла введен двухкаскадный компрессор с промежуточным охлаждением воздуха между каскадами компрессора. Генераторный газ - продукт газификации ТБО характеризуется в 6...10 раз меньшей теплотворной способностью, что требует значительного увеличения расхода топливного газа. В результате массовый расход продуктов сгорания через турбину значительно превысит массовый расход воздуха через компрессор. Требуется увеличение пропускной способности газового тракта турбины или уменьшение массовой производительности компрессора. Ухудшатся условия работы регенератора (рекуперативного типа), поскольку водяной эквивалент продуктов сгорания значительно превысит водяной эквивалент воздуха. При формально предельно высокой степени регенерации фактическая степень утилизации теплосодержания продуктов сгорания (в пределах газотурбинного цикла) оказывается низкой; соответственно реализуется низкий КПД регенеративной ГТУ.

Вторая - ГТУ нетрадиционной схемы с камерой сгорания в газоздушном тракте за турбиной и работой турбины на высокотемпературном чистом воздухе. Воздух после компрессора поступает в высокотемпературный воздухонагреватель, нагревается до проектной температуры входа в турбину, расширяется в турбине и с температурой выхода из турбины подается в камеру сгорания, где участвует в процессе сжигания генераторного газа произвольной запыленности. В схеме исключается проблема эрозионного повреждения лопаток турбины, но вводится проблемный элемент - высокотемпературный воздухонагреватель.

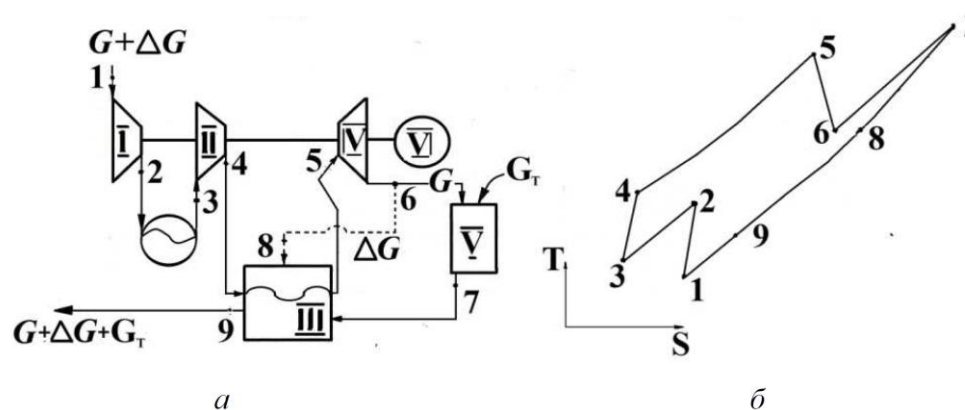
Высокотемпературный воздухонагреватель выполняет функцию регенератора со степенью 1,0 (нагрев воздуха от температуры после компрессора до температуры воздуха на выходе из турбины) и функцию камеры сгорания (нагрев воздуха от температуры входа в камеру сгорания до температуры на входе в турбину).

С учетом температурного напора между греющим газом (продуктами сгорания на выходе из камеры сгорания) и высокотемпературным воздухом на входе в турбину температура продуктов сгорания за камерой сгорания должна превышать температуру перед турбиной. Чем выше температура газа, тем больше температурный напор и меньше поверхность теплообмена высокотемпературного воздухонагревателя.

По оценкам [1] для реализации эффективного газотурбинного энергопреобразователя рассматриваемой схемы возможно ограничиться температурой газа за камерой сгорания 1270...1370 К.

Для повышения степени использования теплосодержания продуктов сгорания большей массы и большей удельной теплоемкости нежели нагреваемый воздух, в МВТУ им. Баумана разработана модифицированная схема ГТУ с камерой сгорания за турбиной и перераспределением газоздушных потоков по тракту ГТУ [1, 4, 4].

Принципиальная схема и термодинамический цикл ГТУ приведены на рисунке 4.



а - схема, б - цикл,

I - компрессор низкого давления, II - компрессор высокого давления, III - воздушный теплообменник, IV - турбина, V - камера сгорания (пунктиром обозначена трасса дополнительного воздуха)

Рисунок 4 – Принципиальная схема и цикл газотурбинной установки

Для невилирования теплосодержания воздуха и продуктов сгорания по воздушному тракту воздухонагревателя в дополнение к основному (соответствующему расчетным условиям полного сгорания генераторного газа при заданных температуре входа воздуха в камеру сгорания и температуре выхода продуктов сгорания из камеры сгорания) пропускается дополнительный расход воздуха, который утилизирует недоиспользованное теплосодержание основного воздуха. Место ввода в газовый тракт теплообменника дополнительного расхода воздуха, отбираемого из воздушного тракта за турбиной, соответствует сечению, в котором температура продуктов сгорания снизится и станет равной температуре воздуха за турбиной.

Ввод дополнительного расхода воздуха в компрессор с последующей работой в турбине, байпасированием камеры сгорания и вводом его после турбины в газовый тракт воздухонагревателя приводит к увеличению мощности и КПД ГТУ за счет более глубокой утилизации теплоты уходящих газов - продуктов сгорания низкокалорийного генераторного газа при газификации ТБО. При температуре перед турбиной 1173 К (при которой в турбине можно использовать неохлаждаемые лопатки) КПД газотурбинной установки может превышать 30% [1].

### Литература

1. Иванов В. Л. Газотурбинный двигатель для установки по термической переработке твердых бытовых и промышленных отходов методом газификации / В.Л. Иванов, Т.А. Заживихина // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. - 2006. - № 2. - С. 38 - 42.
2. Иванов В.Л. Твердые бытовые отходы как топливо для газотурбинной установки / В.Л. Иванов, Д.А. Скибин // Вестник ПНИПУ «Электротехника, информационные технологии, системы управления» - 2015. - № 15.
3. Иванов В.Л. Газотурбинный энергопреобразователь для установки утилизации твердых бытовых отходов методом газификации // Вестник Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. - 2012 (Спецвып.). - № 7. - С. 134 - 144.
4. Гуров В.И. Энергопреобразование продукт-газа при утилизации твердых бытовых отходов / В.И. Гуров, В.Л. Иванов, К.Н. Шестаков // Энергия: экономика-техника-экология. - 2009. - № 8. - С. 18 - 22.
5. Универсальная воздушно-турбинная установка: пат. 2395703 РФ / В.Л. Иванов, В.И. Гуров, К.Н. Шестаков, заявл. 25.12.2008.