

УДК 621.438

Об экономической эффективности применения газотурбинных технологий утилизации отходов

Канд. техн. наук **Рахманов Ю.А.** rahmanovua2010@gmail.com

Канд. техн. наук **Сергиенко О.И.** oisergienko@corp.ifmo.ru

Д-р экон. наук **Василенок В.Л.** fem1421@yandex.ru

Горбунов Г.Н. gorbunovg@inbox.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассмотрены вопросы утилизации теплоты высокотемпературных дымовых газов систем термоокислительного обезвреживания твердых коммунальных отходов при использовании газотурбинных технологий. Согласно европейских и российских справочных документов по наилучшим доступным технологиям инсинерация твердых коммунальных отходов является допустимой при условии не превышения разрешенных значений эмиссий загрязняющих веществ в выбросах дымовых газов и утилизации их теплоты для целей внутреннего потребления или для внешних потребителей, что обеспечивает их экономическую и энергетическую эффективность. В качестве систем термоокислительного обезвреживания рассмотрены вращающиеся печи с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=2$ и слоевые печи с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1.6$. Анализируются схема с воздушной турбиной и схема с газовой турбиной с обратной очередностью процессов обезвреживания отходов и утилизации теплоты дымовых газов. Приводится расчетная методика для определения показателей энергоэффективности для газотурбинных технологий с керамическими фильтрами: экономия условного топлива в замещаемых котельной и электростанции, экономия дополнительного топлива и коэффициент использования теплоты. Результаты анализа энергетической эффективности систем термоокислительного обезвреживания с применением воздушных и газотурбинных схем с обратной очередностью процессов с керамическими фильтрами показывают, что «обратная» схема является более экономически эффективной за счет более высокого коэффициента использования теплоты дымовых газов и сокращения их объема. Полученные расчетные данные могут быть использованы при идентификации наилучших доступных технологий энергетической утилизации отходов с применением термоокислительного обезвреживания и газотурбинных технологий.

Ключевые слова: энергоэффективность, термоокислительное обезвреживание, наилучшие доступные технологии (НДТ), газотурбинные технологии, керамические фильтры, коэффициент избытка воздуха, дымовые газы, коэффициент полезного действия, экономия дополнительного топлива.

DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-93-101

On the economic efficiency of gas turbine utilization technologies

Ph.D. Rakhmanov Y.A. rahmanovua2010@gmail.com

Ph.D. Sergienko O.I. oisergienko@corp.ifmo.ru

D.Sc. Vasilenok V.L. fem1421@yandex.ru

Gorbunov G.N. gorbunovg@inbox.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, ul. Lomonosov, 9

The possibilities of utilization of the heat of high-temperature flue gases of the systems of thermal-oxidative utilization of municipal solid waste using gas turbine technologies are considered. According to the European and Russian reference documents for the best available techniques, incineration of municipal solid waste is permissible provided that the permissible values $\alpha=1,6$ of pollutant emissions are not exceeded in flue gases and their heat recovery for internal consumption or for external consumers ensures their energy and economic efficiency. Rotating kilns with an excess air coefficient of $\alpha = 2$ and layered furnaces with an excess air coefficient of $\alpha = 1.6$ are considered as the thermal oxidative neutralization systems. The scheme with the air turbine and the gas turbine with the reverse sequence of waste disposal and heat recovery of flue gases are analyzed. The calculation methodology for determining

the energy efficiency indicators for gas turbine technologies with ceramic filters is given such as saving of equivalent fuel in replaceable boiler houses and power plants, saving of additional fuel and heat utilization factor. The results of the analysis of energy efficiency of thermal-oxidative neutralization systems using air and gas turbine schemes with the reverse sequence of processes and ceramic filters show that the “reverse” scheme is more cost-effective due to the higher utilization rate of flue gas heat and reduction in their volume. The obtained calculated data can be used to identify the best available techniques for energy waste utilization with the use of thermo-oxidative neutralization and gas turbine technologies.

Keywords: energy efficiency, thermo-oxidative neutralization, best available technique, (BAT), gas turbine technology, ceramic filters, excess air coefficient, flue gases, efficiency, additional fuel savings.

Введение

В России ежегодно образуется более 2,1 млрд. тонн твердых коммунальных отходов (ТКО). После предварительной сортировки отходы, подлежащие к переработке, в основном утилизируются на специальных полигонах или в системах термоокислительного обезвреживания, например, в инсинераторах и на мусоросжигательных заводах. Термоокислительное обезвреживание отходов позволяет снизить их объём для захоронения примерно в 10 раз, а также полезно использовать энергию термического окисления для теплоснабжения или получения электрической энергии. Так, в Японии сжигаются с получением электрической энергии более 70 % ТКО, в Швеции – 55 % , во Франции расположенные в пригороде Парижа мусоросжигательные заводы обеспечивают более 80 % энергопотребления города [1].

В то же время эксплуатация мусоросжигательных установок оказывает негативное воздействие на окружающую среду: выбросы в атмосферу и сбросы в водные объекты; образование золы после сжигания; технологический шум и вибрация; дополнительное потребление топлива и реагентов; образование летучих выбросов, в основном в местах хранения отходов; риски при хранении и погрузочно-разгрузочных операциях при обработке опасных отходов.

Разработка и внедрение в ЕС технологических нормативов, предусмотренных директивами [2, 3] применительно к установкам термической нейтрализации отходов нашла свое отражение в европейской иерархии обращения с отходами, которая устанавливает очередность мероприятий, составляющих наилучший экологический вариант решения проблемы обращения с отходами в законодательстве об отходах и соответствующей политике. В то же время отступление от указанной иерархии может быть необходимым для специфических потоков отходов, когда это оправдано рядом причин, в частности технической осуществимостью, рентабельностью и защитой окружающей среды. В европейском справочнике по наилучшим доступным технологиям при сжигании отходов установлены уровни эмиссий, разрешенные европейским законодательством [4], и это дает возможность характеризовать риски загрязнения окружающей среды при эксплуатации мусоросжигательных установок как невысокие при условии снижения выбросов в атмосферу до разрешенных уровней. Тем не менее, основной экологической проблемой в этом секторе по-прежнему остается снижение выбросов в атмосферу [4].

Концепция НДТ служит для комплексного предупреждения и контроля загрязнений окружающей среды и учитывает возможные экономические затраты и экологические выгоды, получаемые в результате реализации НДТ. Как указано и в европейском справочном документе [4], и в российском информационно-техническом справочнике ИТС9 Обезвреживание отходов термическим способом [5], к числу НДТ относится и увеличение энергоэффективности термического обезвреживания отходов путем использования тепла уходящих дымовых газов, как для внешнего потребления – с получением горячей воды, отопления производственных помещений, выработкой электроэнергии, так и путем использования на собственные технологические нужды — для получения пара, горячего воздуха, обогрева и сушки отходов.

При рассмотрении вариантов технологических схем с рекуперацией тепла дымовых газов становится очевидной необходимость учитывать принципы НДТ и логический структурный подход к выбору НДТ на основе эколого-экономических критериев [6, 7]. В настоящей статье рассматриваются методические подходы к определению экономии топлива за счет повышения коэффициента использования тепла при применении газотурбинных технологий. Дальнейший анализ технологий должен строиться на основе сравнения показателей экономической эффективности альтернативных решений [8, 9].

Два варианта газотурбинных технологий утилизации теплоты горячих дымовых газов систем термоокислительного обезвреживания отходов

Для обеспечения качественного сжигания отходов в системах термоокислительного обезвреживания поддерживается температура сжигания 900–1200°C [2]. При этом образуются высокотемпературные газовые продукты в виде дымовых газов, содержащие твердые частицы уносимой золы, теплота которых, практически, не используется. Для снижения затрат на термоокислительное обезвреживание и негативного экологического

воздействия, обычно утилизация теплоты уходящих дымовых газов осуществляется в газодынных подогревателях для получения горячей воды или в паровых котлах – утилизаторах для получения водяного пара, которые могут быть использованы для теплоснабжения, а водяной пар с помощью паровых двигателей – также для получения электрической энергии. Их недостатком является достаточно большая металлоемкость.

В последнее время получают развитие энергетические микрогазотурбинные технологии и установки [10], малой мощности до 1000 кВт различного назначения, в частности для автономных энерготехнологических компонентов. Их достоинством является более энергоэффективное преобразование высокотемпературной теплоты в механическую или электрическую энергию, возможность работы при низких энергетических нагрузках, низкая стоимость эксплуатационных расходов, высокая надежность, что позволяет их использовать для утилизации теплоты дымовых газов систем термоокислительного обезвреживания отходов. Однако применение газотурбинных технологий потребует предварительной очистки дымовых газов от твердых частиц.

Для газоочистки могут использоваться разработанные в НИИОГАЗЕ конструкции фильтров с импульсной регенерацией, оснащенные керамическими элементами Gerafil фирмы «MadissonFiltor», способные работать при температуре до 900 °С с одновременным удалением диоксинов и оксидов азота [11, 12], а также керамические фильтровальные элементы ЗАО «НТИ БАКОР», способные работать при температуре газов до 900 °С и разработанная на их основе фильтровальная установка ФКИ – 45Т с импульсной регенерацией сжатым воздухом [13]. Они предназначены для очистки от пыли высокотемпературных, нетоксичных и невзрывоопасных газов в металлургической, химической и перерабатывающих промышленности без потери утилизируемой теплоты.

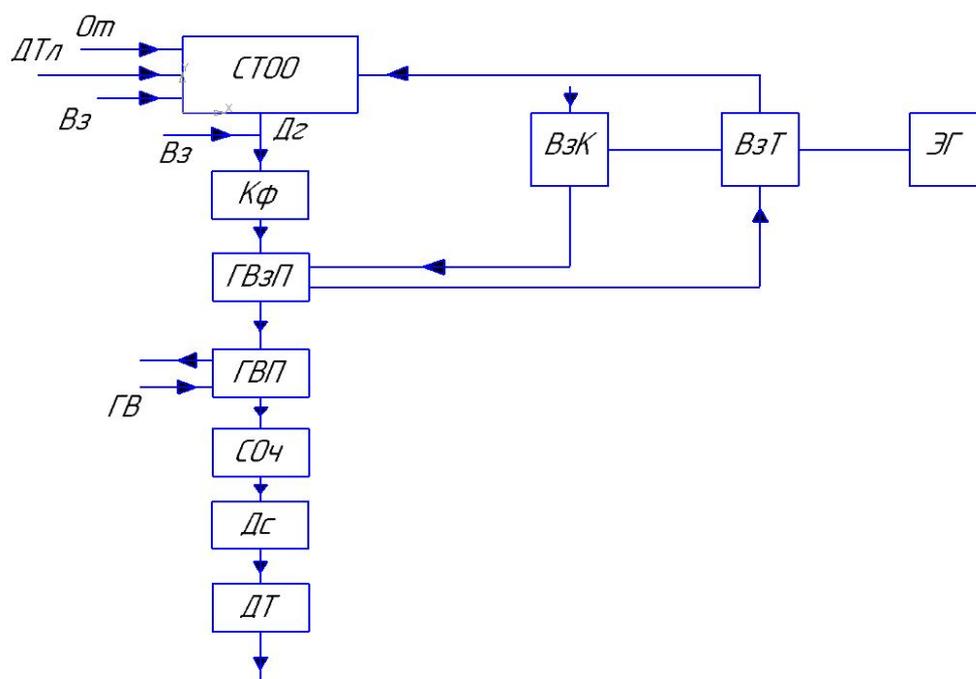
Рассмотрим два варианта газотурбинных технологий утилизации теплоты горячих газов систем термоокислительного обезвреживания с предварительной очисткой (обеспыливанием) с помощью керамических высокотемпературных фильтров: с использованием воздушной турбины (рис. 1, а) и газовой турбины (рис. 1, б) [14–18]. В первой схеме рабочим телом для турбины является горячий чистый воздух, нагретый уходящими дымовыми газами, во второй – сами уходящие дымовые газы после предварительной очистки.

Принципиальная схема системы термоокислительного обезвреживания с утилизацией теплоты уходящих дымовых газов (СТОО) при использовании воздушной турбинной технологии (рис. 1, а) [14–18] включает в себя воздушную турбину (ВзТ), работающую на высокотемпературном чистом воздухе (Вз) и работает следующим образом: чистый атмосферный воздух (Вз) поступает в воздушный компрессор (ВзК), которым под повышенным давлением и температурой подается в газовоздушный подогреватель (ГВзП), где подогревается уходящими из системы термоокислительного обезвреживания (СТОО), предварительно очищенными в керамическом фильтре (КФ), дымовыми газами (ДГ) под повышенным давлением от температуры воздуха на выходе из компрессора (ВзК) до температуры, допустимой для воздушной турбины (ВзТ).

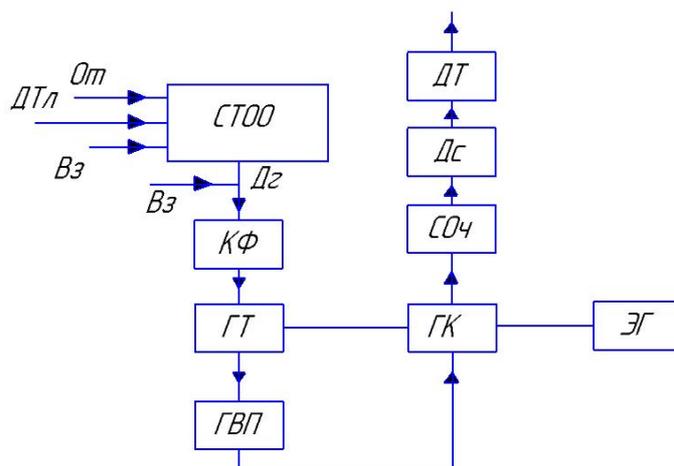
В воздушной турбине (ВзТ) подогретый воздух расширяется до давления близкого к атмосферному. Совершаемая при этом работа используется для привода воздушного компрессора (ВзК) и электрогенератора (ЭГ). Отработанный в турбине (ВзТ) воздух (Вз) имеет высокую температуру и может быть направлен в систему термоокислительного обезвреживания (СТОО) для обеспечения термического окисления отходов (От) и к потребителю теплоты (ПТс). При работе по данной технологии уходящие газы (Дг) проходят через высокотемпературный фильтр (КФ), где осуществляется их очистка от уносимой золы до концентрации, допустимой для газовоздушного подогревателя (ГВзП).

Если температура уходящих газов дымовых газов (ДГ) превышает допустимую для керамического фильтра (КФ), их можно охладить до допустимой температуры, подмешивая атмосферный воздух (Вз) перед керамическим фильтром (КФ). Обычно в газовоздушном подогревателе (ГВзП) дымовые газы (ДГ) охлаждаются до температуры работы системы газоочистки (СОч) и газоудаления, включающей дымосос (ДС) и дымовую трубу (ДТ).

При избыточном тепловыделении со стороны дымовых газов относительно тепловосприятости со стороны нагреваемого воздуха после газовоздушного подогревателя (ГВзП) для более полного использования теплоты уходящих газов дымовых газов может быть установлен газодынный подогреватель (ГВП) для подогрева воды системы водяного теплоснабжения [19, 20].



а)



б)

Рис. 1. Газотурбинные технологии утилизации теплоты уходящих дымовых газов систем термоокислительного обезвреживания

- а) классическая «прямая схема» с применением воздушной турбинной установки;
- б) схема с «обратной» очередностью с газовой турбиной

СТОО – система термоокислительного обезвреживания; От – отходы; Вз – чистый воздух; ДТл – дизельное топливо; ДГ – дымовые газы; КФ – керамический фильтр; ГВзП – газоздушный подогреватель; ГВП – газозводной подогреватель; СВ – сетевая вода; СОч – система отчистки; Дс – дымосос; ВзТ – воздушная турбина; ВзК – воздушный компрессор; ЭГ – электрический генератор; ГВз – горячий воздух; ПТе – потребитель теплоты; ГТ – газовая турбина; ГК – газовый компрессор

Принципиальная технологическая схема СТОО с утилизацией теплоты уходящих дымовых газов при использовании газотурбинной установки (ГТУ) с обратной очередностью процессов (рис.1.б)[17, 21] работает следующим образом. Уходящие из системы СТОО дымовые газы (ДГ) при температуре 850 – 1250 С проходят через керамические фильтр (КФ), где осуществляется их очистка от уносимой золы до концентрации, допустимой для газовой турбины (ГТ). В случае необходимости снижения температуры уходящих дымовых газов

(ДГ) до температуры, допустимой для керамического фильтра (КФ) и газовой турбины (ГТ) к ним осуществляется подмешивание атмосферного воздуха (Вз).

В газовой турбине (ГТ) высокотемпературные дымовые газы (ДГ) расширяются от давления, близкого к атмосферному, до разрежения, создаваемого газовым компрессором (ГК). Совершаемая при этом работа используется для привода газового компрессора (ГК) и электрического генератора (ЭГ). Отработанные в газовой турбине (ГТ) дымовые газы (ДГ) поступают в газовойодяной подогреватель (ГВП), где охлаждается водой, которая может быть использована в системе теплоснабжения, до температуры 27 – 30 С и направляются в газовый компрессор (ГК), в котором давление дымовых газов (ДГ) повышается до атмосферного. В случае необходимости дымовые газы (ДГ) после газового компрессора (ГК) проходят систему очистки (СОч) и с помощью дымососа (ДС) и дымовой трубы (ДТ) удаляются в окружающую среду.

Рассмотренные газотурбинные технологии утилизации теплоты дымовых газов систем термоокислительного обезвреживания позволяют получить помимо обезвреженных отходов дополнительно механическую, электрическую и тепловую энергию.

Методика оценки энергетической эффективности газотурбинных технологий для термического обезвреживания отходов

Для оценки энергетической эффективности применения газотурбинных технологий были выполнены расчёты технологических схем систем термоокислительного обезвреживания твердых коммунальных отходов с использованием воздушных турбинных установок и газотурбинных установок с обратной очередностью процессов. Расчёты выполнены для систем термоокислительного обезвреживания с использованием вращающихся печей (коэффициент избытка воздуха $\alpha=2$) и слоевых печей (коэффициент избытка воздуха $\alpha=1.6$). При выполнении расчетов учитывали необходимое подмешивание атмосферного воздуха для обеспечения надёжной работы керамического фильтра, газоздушного подогревателя и газовой турбины. В качестве дополнительного топлива было принято дизельное топливо, потери теплоты в реакционном объёме системы термоокислительного обезвреживания – 5 %, температура дымовых газов перед керамическим фильтром – 900°С, температура дымовых газов перед газовой турбиной – 800°С, температура воздуха перед воздушной турбиной – 800°С, степень повышения давления в компрессоре – 3, коэффициент полезного действия механический – 0,92, электрического генератора 0,95, изотропный коэффициент полезного действия турбины – 0,82, компрессора 0,8.

Производительность системы термоокислительного обезвреживания по отходам была принята 1000 кг/ч. Элементарный химический состав отходов: СР=25 %, НР=3.2%, ОР=19.8%, NP=0.51 %, SPЛ=0.19%, AP=12.3%, WP=39% [18 9. Economic efficiency of technical solutions [Electronic resource] / S.G. Baranchikova [et al.]; by ed. I.V. Ershova. - Ekaterinburg: UrFU, 2016. - 140 p. - Access Mode: URL: <https://e.lanbook.com/book/98774>. - Title from the screen.].

Удельная низшая рабочая теплота сгорания $Q_{Н}^P=1588$ ккал/кг=6553.72 кДж/кг, температура уходящих дымовых газов $t_{yx}=1200^{\circ}\text{C}$.

Расход дополнительного топлива $V_{ДТЛ}$ [кг/ч] для обеспечения процессатермоокислительного обезвреживания отходов:

$$V_{ДТЛ} = \frac{[V_{Г} * c_{Г} * t_{СТО}'' + q_{ИСП} - Q_{Ном}^P * (1 - q_{ПОТ}) - \alpha_{om} * V_{om}^0 * c_{ВЗ} * t_{ВЗ}] * G_{ОТ}}{Q_{ДТЛ}^{ПОЛ}}$$

где, $V_{Г}$ — количество дымовых газов при термоокислительном обезвреживании 1 кг отходов; $q_{ИСП}$ – теплота испарения компонентов 1 кг отходов; $c_{Г}$ – удельная объёмная теплоемкость дымовых газов; $t_{СТО}''$ – температура термоокислительного обезвреживания; $Q_{Ном}^P$ – удельная низшая рабочая теплота сгорания 1 кг отходов; $q_{ПОТ}$ – потери теплоты процесса термоокислительного обезвреживания; α_{om} – коэффициент избытка воздуха процесса термоокислительного обезвреживания; V_{om}^0 – теоретическое количество воздуха для т обезвреживания 1 кг отходов; $c_{ВЗ}$ – удельная объёмная теплоемкость воздуха; $t_{ВЗ}$ – температура воздуха, подаваемого для термоокислительного обезвреживания; $Q_{ДТЛ}^{ПОЛ}$ – удельная полезная теплота сгорания 1 кг дополнительного топлива; $Q_{Номл}^P$ – удельная низшая рабочая теплота сгорания дополнительного топлива; $V_{ДТЛ}^Г$ – количество дымовых газов при сжигании 1 кг дополнительного топлива.

Экономия дополнительного топлива за счет подачи для термоокислительного обезвреживания горячего отработанного в турбине воздуха:

$$\Delta B = \frac{V_{B3} * c_{B3} * t_T'' - G_{om} * \alpha_{om} * V_{om}^0 * c_{B3} * t_{B3}}{Q_{ДТЛ}^{ПОЛ}}$$

где, V_{B3} – расход отработанного воздуха после воздушной турбины; t_T'' – температура воздуха на выходе из турбины.

Располагаемая тепловая мощность $\dot{Q}_{РАСП}$, кВт:

$$\dot{Q}_{РАСП} = G_{OT} * Q_{Нот}^P + B * Q_{Нотл}^P$$

Коэффициент использования теплоты:

$$\eta_U = \frac{N_{Э} + \dot{Q}_{ТЕ}}{\dot{Q}_{РАСП}}$$

$N_{Э}$ – получаемая электрическая мощность, кВт; $\dot{Q}_{ТЕ}$ – получаемая для потребителя тепловая мощность, кВт

Экономия условного топлива в замещаемой котельной, кг/ч:

$$\Delta B_{KV} = \frac{Q_{ТЕ} * 3600}{Q_{VT} * \eta_{KV}}$$

η_{KV} – коэффициент полезного действия замещаемой котельной (принят равным 0,9).

Экономия условного топлива в замещаемой электрической станции:

$$\Delta B_{KЭС} = \frac{N_{Э} * 3600}{Q_{VT} * \eta_{KЭС}}$$

$\eta_{KЭС}$ – коэффициент полезного действия замещаемой электрической станции (принят равным 0,37).

Результаты оценки повышения энергоэффективности систем термоокислительного обезвреживания отходов на основе газотурбинных установок

Основные расчетные характеристики систем термоокислительного обезвреживания ТКО с использованием воздушных и газотурбинных установок производительностью по отходам 1000 кг/ч и с температурой уходящих газов после СТОО 1200 °С показаны в табл. 1.

Результаты расчетов показывают, что при производительности системы по перерабатываемым отходам 1000 кг/ч применение воздушной турбинной установки для утилизации теплоты уходящих дымовых газов позволяет при изменении коэффициента избытка воздуха процесса термоокислительного обезвреживания в интервале 2 – 1,6 сократить расход дополнительного топлива на 190-152 кг/ч, потребляемого воздуха на 2313 – 1849 м³_н/ч, образующихся дымовых газов на 2482 – 1982 м³_н/ч, получить дополнительно электрическую 222 – 177 кВт и тепловую 2671 – 1848 кВт мощности, сократить расход условного топлива в замещаемых котельных и тепловых конденсационных электрических станциях 309 – 242 кг/ч.

Коэффициент использования теплоты в системе термоокислительного обезвреживания достигает 0,73 – 0,82. Расход воздуха через турбину составляет 1,74 – 1,3 кг/с. При продолжительности работы системы термоокислительного обезвреживания 6000 ч/год годовая экономия качественного дополнительного топлива составит 1139 – 910 т/год, условного топлива в замещенных теплоэнергетических установках 1852 – 1453 т/год.

Таблица 1

Сравнительная характеристика газотурбинных технологий по показателям энергоэффективности

Показатель энергоэффективности	Размерность	Схема 1а – воздушная турбина		Схема 1б – газовая турбина	
		$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2$
Расход дополнительного топлива	кг/ч	3,4	72,1	155,2	262
Экономия дополнительного топлива	кг/ч	151,8	189,9	–	–
Снижение расхода воздуха на термоокислительное обезвреживание	м ³ _н /ч	1849	2313	–	–
Снижение расходов дымовых газов	м ³ _н /ч	1982	2482	–	–
Электрическая мощность	кВт	177,2	222,4	368,4	492,1
Отпускаемая тепловая мощность	кВт	1345,4	1722,2	2452,3	4934,2
Располагаемая тепловая мощность	кВт	1843,3	2670,8	2452,3	4934,2
Коэффициент использования теплоты	кг _{гт} /ч	0,82	0,73	0,768	0,766
Экономия условного топлива в замещаемой котельной	кг _{гт} /ч	193,5	235	335,3	448,9
Экономия условного топлива в замещаемой конденсационной электростанции	кг _{гт} /ч	58,8	73,8	122,2	163,3
Расход воздуха через турбину	кг/с	1,39	1,74	–	–
Расход дымовых газов через турбину	кг/с	–	–	3,86	5,214

Применение газотурбинных установок с обратной очередностью процессов по сравнению с классической схемой при изменении коэффициента избытка воздуха α процесса термоокислительного обезвреживания в интервале от 2 до 1,6 позволяет получить дополнительно электрическую 492 – 368 кВт и тепловую 4934 – 2452 кВт мощности, сократить расход условного топлива в замещаемых котельных и тепловых конденсационных электрических станциях на 612 – 457 кг_{гт}/ч.

Коэффициент использования теплоты в системе термоокислительного обезвреживания в этом случае достигает 0,766 – 0,768. Расход дымовых газов через турбину составляет 5,2 – 3,8 кг/с.

При работе системы термоокислительного обезвреживания 6000 ч/год годовая экономия условного топлива в замещаемых теплоэнергетических установках составит 3672 – 2742 т_{гт}/год.

Полное использование теплоты отработанного воздуха из турбины для термоокислительного обезвреживания обуславливает несколько больший коэффициент использования теплоты при применении воздушной турбинной установки.

В случае применения газотурбинной установки с измененной очередностью процессов через турбину проходят все очищенные дымовые газы, в том числе подмешанный воздух.

Заключение

Анализ полученных результатов расчётов свидетельствует о возможности эффективной утилизации теплоты уходящих газов систем термоокислительного обезвреживания с использованием газотурбинных технологий для дополнительного получения электрической и тепловой энергии, которые могут быть использованы для энергоснабжения как самой системы, так и для сторонних потребителей.

Зная расходы воздуха и дымовых газов через турбину можно подобрать проточные части типовых газотурбинных установок, разработать и реализовать на их основе утилизационные воздушные турбинные или газотурбинные установки с измененной очередностью процессов газотурбинные установки.

Для реализации рассмотренных газотурбинных технологий требуется разработка фильтра для очистки высокотемпературных дымовых газов от уносимой золы на основе керамических фильтровальных элементов, высокотемпературного газоздушного подогревателя, соответствующего параметрам уходящих дымовых газов и воздушной турбинной установки. Применение керамических фильтров и системы очистки уходящих дымовых газов зависят от химического состава обезвреживаемых отходов, и не всегда является обязательным. Например, при термоокислительном обезвреживании газообразных отходов надобность в керамических фильтрах отсутствует.

Полученные в работе расчетные данные могут быть использованы при идентификации наилучших доступных технологий энергетической утилизации отходов с применением термоокислительного обезвреживания и газотурбинных технологий.

Литература

1. *Рябов Ю.В.* Твердые бытовые отходы: захоронение, сжигание, переработка. [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL:<http://rareearth.ru/ru/news/2016041/02476.html>
2. ИТС 9 – 2015 Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов). [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128669>
3. Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. European Commission. Joint Research Centre. Institute for prospective technological studies. July 2006. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL:http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ecm_bref_0706.pdf
4. *Сокорнова Т.В., Королёва Е.Б., Сергиенко О.И., Кряжев А.М.* Экономические аспекты внедрения НДТ // Экология производства. 2012. № 10. С. 28–36.
5. Организационно-экономический механизм повышения эффективности функционирования промышленных предприятий [Электронный ресурс]: монография / М.С. Абрашкин [и др.]. - Москва : Научный консультант, 2015. - 269 с. — Режим доступа: URL: <https://e.lanbook.com/book/74014>
6. *Буракова А.В., Рахманов Ю.А.* К вопросу очистки высокотемпературных газов печей термообработки металлических изделий // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент» 2014. № 1.
7. *Козловский В.Ю., Жилинская Е.Н.* Керамические фильтровальные элементы GERAFIL. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://newchemistry.ru>
8. *Краснов Б.М., Серебрянский Д.А.* Системы и аппараты для очистки технологических и дымовых газов от твердых частиц компании ЗАО «НТЦ Бакор». Сборник докладов 9 международной конференции пылегазоочистка. 2016, 27–28 сентября 2016, –М.:, ООО «ИНТЕХНО».
9. Способ утилизации теплоты сгорания твёрдых бытовых отходов на мусоросжигательной установке и устройство для его реализации. Авторы патента Дыган М.М., Гонопольский А.М., Картавый А.Н. Косых В.А. Патент RU2515442 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: www.findpatent.ru/patent/251/2515442.html
10. Универсальная воздушно – турбинная энергетическая установка. Авторы: Гуров В.И., Иванов В.Л., Шестаков К.Н. Патент РФ 2395703 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://www.findpatent.ru/patents/2395703/>
11. *Иванов В.Л.* Газотурбинных энергопреобразователь для установки утилизации твёрдых бытовых отходов методом газификации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 7. С. 134–144.
12. *Осипов М.И., Моляков В.Д., Тумашиев Р.З., Иванов В.Л.* Энергетическая газотурбинная установка, использующая теплоту газа литейного производства // МГТУ им. Н.Э. Баумана.
13. *Красный Б.Л., Тарасовский В.П.* Труды международной научно – практической конференции 11 – 14 ноября 2005 года г. Москва, ОАО «Малая энергетика» С. 55 – 58
14. *Осипов М.И., Моляков В.Д., Тумашиев Р.З., Иванов В.Л., Заживихина Т.А., Елисеев Ю.С.* Проблемы создания ГТУ для утилизации твёрдых бытовых отходов и низкотемпературного твердого топлива // МГТУ им. Баумана.

15. Буракова А.В., Рахманов Ю.А. К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2014. № 1.
16. Зюотин В.Е, Калинин Н.М. Эффективные рекуператоры тепла нового поколения. К.Т.Н. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://www.rosteplo.ru>
17. Тумашев Р.З., Бодров Н.Г. Когенеративная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжелых углеводородов // Вестник МГТУ им. Н.Э Баумана Серия «Машиностроение». 2016. № 6. 201 с.

References

1. Ryabov YU.V. Tverdye bytovye othody: zahoroneniye, szhiganiye, pererabotka. [EHlektronnyj resurs]–Rezhim dostupa: URL:<http://rareearth.ru/ru/news/2016041/02476.html>
2. ITS 9 – 2015 Obezvrezhivaniye othodov termicheskim sposobom (szhiganiye othodov). [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128669>
3. Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. European Commission. Joint Research Centre. Institute for prospective technological studies. July 2006. [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL:http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ecm_bref_0706.pdf
4. Sokornova T.V., Korolyova E.B., Sergienko O.I., Kryazhev A.M. EHkonomicheskie aspekty vnedreniya NDT // EHkologiya proizvodstva. 2012. № 10. S. 28–36.
5. Organizacionno-ehkonomicheskij mekhanizm povysheniya ehffektivnosti funkcionirovaniya promyshlennyh predpriyatij [EHlektronnyj resurs]: monografiya / M.S. Abrashkin [i dr.]. - Moskva : Nauchnyj konsul'tant, 2015. - 269 p. – Rezhim dostupa: URL: <https://e.lanbook.com/book/74014>
6. Burakova A.V., Rahmanov YU.A. K voprosu ochistki vysokotemperaturnyh gazov pechej termoobrabotki metallicheskih izdelij // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «EHkonomika i ehkologicheskij menedzhment» 2014. № 1.
7. Kozlovskij V.YU., ZHilinskaya E.N. Keramicheskie fil'troval'nye ehlementy GERAFIL. [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL: <http://newchemistry.ru>
8. Krasnov B.M., Serebryanskij D.A. Sistemy i apparaty dlya ochistki tekhnologicheskikh i dymovyh gazov ot tverdyh chastic kompanii ZAO «NTC Bakor». Sbornik dokladov 9 mezhdunarodnoj konferencii pylegazootchistka. 2016, 27–28 sentyabrya 2016, –M.:, ООО «INTEKHNO».
9. Sposob utilizacii teploty sgoraniya tvyordyh bytovyh othodov na musoroszhigatel'noj ustanovke i ustrojstvo dlya ego realizacii. Avtory patenta Dygan M.M., Gonopol'skij A.M., Kartavyj A.N. Kosyh V.A. Patent RU2515442 [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL: www.findpatent.ru/patent/251/2515442.html
10. Universal'naya vozdušno – turbinnaya ehnergeticheskaya ustanovka. Avtory: Gurov V.I., Ivanov V.L., SHestakov K.N. Patent RF 2395703 [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL: <http://www.findpatent.ru/patents/2395703/>
11. Ivanov V.L. Gazoturbinnyh ehnergopreobrazovatel' dlya ustanovki utilizacii tvyordyh bytovyh othodov metodom gazifikacii // Vestnik MGTU im. N.EH. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2012. № 7. P. 134–144.
12. Osipov M.I., Molyakov V.D., Tumashev R.Z., Ivanov V.L. EHnergeticheskaya gazoturbinnaya ustanovka, ispol'zuyushchaya teplotu gaza litejnogo proizvodstva // MGTU im. N.EH. Baumana.
13. Krasnyj B.L., Tarasovskij V.P. Trudy mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoy konferencii 11 – 14 noyabrya 2005 goda g. Moskva, OAO «Malaya ehnergetika». P. 55 – 58
14. Osipov M.I., Molyakov V.D., Tumashev R.Z., Ivanov V.L., Zazhivihina T.A., Eliseev YU.S. Problemy sozdaniya GTU dlya utilizacii tvyordyh bytovyh othodov i nizkotemperaturnogo tverdogo topliva // MGTU im. Baumana.
15. Burakova A.V., Rahmanov YU.A. K voprosu rekuperacii teploty gazov pechej termoobrabotki metallicheskih izdelij. // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «EHkonomika i ehkologicheskij menedzhment». 2014. № 1.
16. Ziotin V.E, Kalinin N.M. EHffektivnye rekuperatory tepla novogo pokoleniya. К.Т.Н. [EHlektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: URL: <http://www.rosteplo.ru>
17. Tumashev R.Z., Bodrov N.G. Kогенеративная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжелых углеводородов // Vestnik MGTU im. N.EH Baumana Seriya «Mashinostroenie». 2016. № 6. 201 p.

Статья поступила в редакцию 19.02.2019 г.