

# ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АПРОБАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ

**А. В. Рыжков**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **А. С. Ощепков**, канд. техн. наук, исполнительный директор, **Д. С. Католиченко**, инженер, **Н. Н. Ефимов**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник, **В. И. Паршуков**, генеральный директор, ООО НПП «Донские технологии»

Главная цель разработчиков мобильных энерготехнологических комплексов (ЭТК) – решение проблемы переработки отходов в местах их образования. Энергетическая автономность ЭТК по переработке отходов – важнейшее конкурентное преимущество комплексов. Коллектив ученых и инженеров активно ведет пусконаладочные работы и испытания двух экспериментальных образцов ЭТК по переработке ТКО и сельскохозяйственных отходов. Представляем результаты проведенной работы.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

переработка отходов, энерготехнологический комплекс, сжигание лузги, пусконаладочные работы, результаты испытаний

### Описание энерготехнологических комплексов

В период с 2018 по 2020 год консорциум отечественных промышленных предприятий и научных организаций под руководством ООО НПП «Донские технологии» выполнил разработку экспериментальных

энерготехнологических комплексов по переработке твердых коммунальных и сельскохозяйственных отходов в тепловую и электрическую энергию.

Экспериментальный образец ЭТК по переработке ТКО в 2020 году был поставлен на опытную эксплуатацию в составе мусороперерабатывающего завода ОАО «Автопарк № 1 “Спецтранс”» (Санкт-Петербург), где прохо-

дил модернизацию (рис. 1). Он представляет собой установку мобильного типа и модульного исполнения в 20-футовом промышленном контейнере. Производительность экспериментального реактора – 150 кг/ч. Микроэнергетическая установка в составе комплекса рассчитана на выработку 30 кВт электрической энергии и до 400 Вт тепловой. Общий коэффициент использования



Рис. 1. Экспериментальный образец ЭТК по переработке ТКО



Рис. 2. Турبوустановка в составе экспериментального ЭТК по переработке лузги

первичного топлива находится на уровне 90 %. Мобильность комплекса резко сокращает расходы на транспортировку отходов, что особенно актуально для средних и малых городов, а также населенных пунктов, расположенных в сельской местности. Автономность работы ЭТК и отсутствие необходимости прокладки дополнительных электрических сетей значительно повышают экономическую эффективность переработки ТКО.

Экспериментальный образец ЭТК по переработке сельскохозяйственных отходов (рис. 2) расположен в Новочеркасске на площадке Индустриального парка. Занимаемая комплексом площадь – 100 м<sup>2</sup>. Основные энергетические характеристики приведены в табл. 1. Поговорим подробнее об отработке технологических решений, реализованных в этом образце ЭТК.

Основное оборудование: парогенератор с выделенной топочной камерой, паровая микротурбина и электрический генератор. Принципиальная тепловая схема приведена на рис. 3. Преобразование пара осуществляется по циклу Ренкина.

### Отладка режима работы топочного устройства

С начала испытаний и по сегодняшний день пусконаладочные работы проводятся с использованием лузги подсолнечника в качестве топлива. Помимо этого, комплекс рассчитан на сжигание лузги гречихи и риса, а также на переработку отходов деревообработки – щепы или опилок.

Для загрузки сырья и непрерывной работы в течение нескольких часов в составе комплекса имеется шнековый питатель с бункером. Вращение шнека обеспечивает подачу топлива в топку, где топливо смешивается с первичным воздухом. Топливо сгорает при температуре 600–1 000 °С. Интенсивность горения, температура внутри топки и, соответственно, тепловая мощность и производительность комплекса могут быть изменены операторами согласно экспериментально полученным стехиометрическим зависимостям.

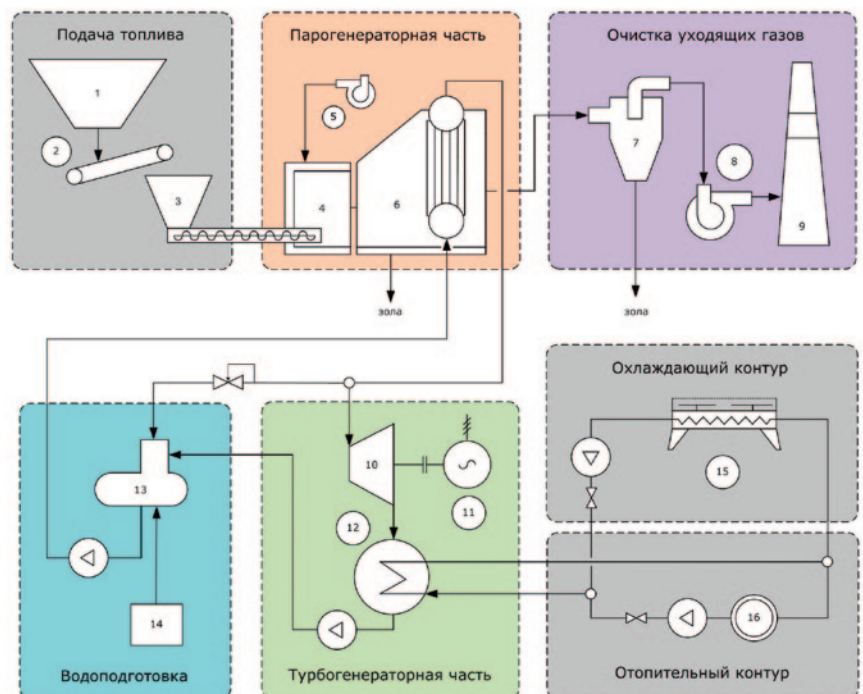
Ранее, на первых этапах пусконаладки, шнек работал с периодичностью 1 мин, загружая топку топливом порци-

Таблица 1 Основные энергетические характеристики комплекса

Характеристики	Значение
Производительность по утилизации отходов, т/ч (тыс. т/год)	0,2 (1,2)
Основные виды топлива: лузга подсолнечника, гречихи, кофе, древесные опилки	
Влажность топлива, %	до 10
Расчетная теплота сгорания топлива, кДж/кг	17 000
Тепловая мощность, кВт	600
Электрическая мощность, кВт	50
Коэффициент полезного использования топлива	0,92
Рабочее давление пара, МПа	0,6
Температура насыщенного пара, °С	165
Номинальная паропроизводительность, кг/ч	800
Неперерабатываемый остаток, % от сухой массы топлива	до 3

Таблица 2 Оптимальные соотношения подачи топлива и воздуха в топку

Показания на частотном преобразователе на подаче топлива, Гц	Частота вращения двигателя подачи топлива, об/мин	Расход топлива, кг/ч	Показания на частотном преобразователе на подаче воздуха, Гц	Частота вращения двигателя вентилятора, об/мин
8,77	263,1	200,62	14,62	877,2
8,40	252,0	144,00	14,00	840,0
5,40	162,0	92,60	9,00	540,0
4,80	144,0	82,30	8,00	480,0



1 – бункер топлива; 2 – транспортная лента; 3 – шнековый питатель; 4 – топка; 5 – дутьевой вентилятор; 6 – парогенератор; 7 – циклон; 8 – дымосос; 9 – дымовая труба; 10 – паровая турбина; 11 – электрогенератор; 12 – конденсатор; 13 – деаэратор; 14 – водоподготовительная установка; 15 – сухая градирия; 16 – тепловой потребитель

Рис. 3. Тепловая схема ЭТК по переработке лузги



**Таблица 3** Результаты замеров выбросов вредных веществ

Параметр	Среднесуточные концентрации, мг/м <sup>3</sup>		Результаты разовых замеров с интервалом 5 мин, мг/м <sup>3</sup>			Результаты замеров аккредитованной лабораторией, мг/м <sup>3</sup>
	Нормативы ЕС	Нормативы РФ	1	2	3	
Оксид углерода CO	50	300	75	90	85	< 150
Оксиды азота NO <sub>x</sub>	200	250	220	230	200	126 ± 19
Оксиды азота NO	–	–	140	135	125	–
Диоксид серы SO <sub>2</sub>	50	200	–	–	–	< 90
Твердые частицы	100	300	–	–	–	436 ± 109*
Температура уходящих газов	–	–	256	265	263	260

\* Концентрация твердых пылевидных частиц завышена. В конструкции экспериментального ЭТК не предполагалась установка системы углубленной очистки уходящих газов.

онно, дутьевой вентилятор работал постоянно. При этом наблюдался скачкообразный процесс горения с большим выбросом механического недожога. Исправили недочет включением в схему электропитания двигателя частотного преобразователя, позволяющего

регулировать обороты шнека и держать их на постоянном, необходимом для того или иного режима значении. Затем была установлена зависимость между расходом топлива и расходом воздуха путем оценки данных газоанализатора (табл. 2).

Процесс горения низкого качества давал высокие показания по выбросам CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> при недостаточной (около 200 °С) температуре уходящих газов. Наилучшие показатели горения были достигнуты при значениях выбросов, приведенных в табл. 3.

Измерения производились с помощью газоанализатора Testo 350. Точка забора уходящих газов располагалась на входе в дымовую трубу.

Также к процессу отладки были подключены специалисты Ростовской испытательной лаборатории («Центр лабораторного анализа и технических измерений по ЮФО»), которые провели обширные измерения концентрации веществ в уходящих газах. По итогам исследований получено положительное заключение. Основные усредненные показания измерений сведены в табл. 3.

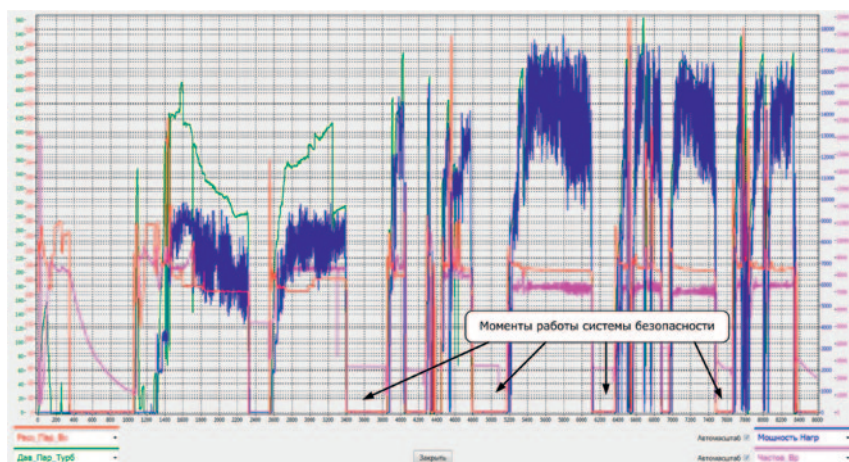
### Испытания турбогенератора

Высокая частота вращения при несоблюдении соосности валов турбины и генератора влечет быстрый износ подшипниковых узлов, высокий шум при выходе в номинальный режим и биение. С целью исключения подобных явлений были проведены работы по центровке валов и произведена замена муфты, предоставленной заводом – изготовителем турбины, на менее массивный и габаритный вариант (рис. 4).

Для обеспечения безопасности работы высокооборотного турбогенератора во время пуска наладки частота его вращения была ограничена 10500 об/мин за счет использования пароперепускного и отсечного клапанов. При достижении верхней границы



**Рис. 4.** Центровка валов турбины и генератора



**Рис. 5.** Работы системы безопасности от выбега ротора турбогенератора

установок включается в работу клапан, отводящий часть пара в байпасную линию, и, если частота оборотов продолжает расти, срабатывает клапан, полностью отсекающий подачу пара на турбину, которая, находясь под электрической нагрузкой, тормозится (рис. 5).

В последующих экспериментальных запусках комплекса по набору нагрузки и регулированию электрической мощности турбоустановки была выбрана наиболее оптимальная для нестационарных режимов частота вращения – 8500 об/мин, при которой механическая нагрузка на подшипниковые узлы значительно снижена.

### Оценка результатов испытаний

С целью мониторинга и контроля параметров рабочих сред, частоты вращения, мощности турбоустановки и других выходных характеристик группой инженеров был разработан программно-аппаратный комплекс, интерфейс которого представлен на рис. 6. Программа позволяет в режиме реального времени получать параметры процесса, следить за динамикой их изменения и вести запись выходных характеристик на протяжении каждого этапа испытаний.

Благодаря этому в ходе испытаний по ступенчатому набору мощности (5,0–8,0–10,0–14,5 кВт) построены динамические зависимости (рис. 7).

Анализ данных испытаний в 3 интервалах времени (2700–3400 с, когда снималась мощность 8 кВт; 5400–6200 и 7100–7500 с, когда снималась мощность 14,5 кВт) позволил рассчитать энергетические характеристики комплекса и оценить их расхождение с расчетными значениями, полученными на стадии разработки турбогенератора.

Тепловая мощность котла в ходе испытаний составляла ориентировочно 510 кВт (при  $Q_{\text{нр}} = 17 \text{ МДж/кг}$ , КПД котла 0,75 и расходе лугзи 144 кг/ч). Тем самым коэффициент использования первичного топлива энергоустановкой составил 0,81.

Стоит отметить тот факт, что в процессе испытаний комплекс работал не в номинальном режиме, что отражается на показателях тепловой и электрической мощности, а также на КПД. Проектное значение абсолютного электрического КПД турбины составляет 0,0764.

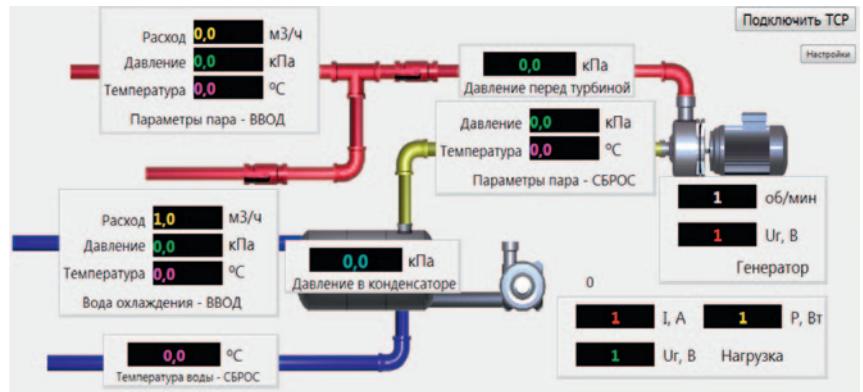


Рис. 6. Интерфейс программно-аппаратного комплекса

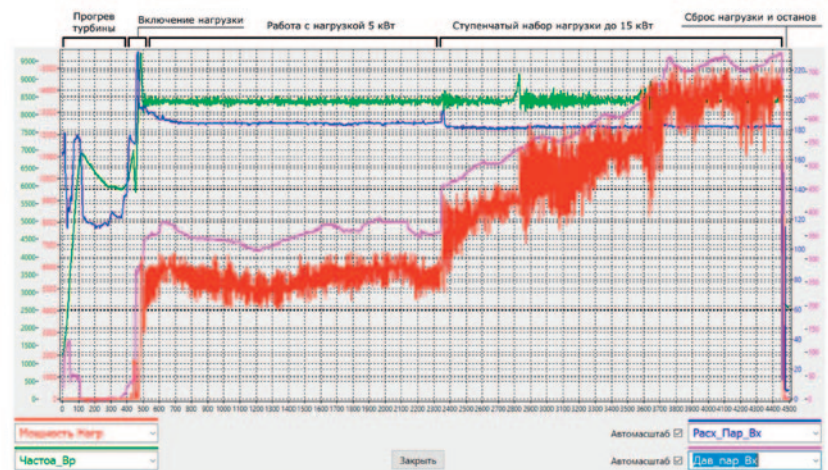


Рис. 7. Динамика различных характеристик в процессе испытаний по набору мощности

Таблица 4 Расчет мощности турбины

Расчетное значение мощности, кВт	Экспериментально полученное значение мощности, кВт	Погрешность, %
6,572	7,720	14,87
13,674	14,692	6,93
13,855	14,797	6,37

Таблица 5 Расчет мощности конденсатора и КПД турбины по выработке электрической энергии

Мощность конденсатора, кВт	Общая мощность энергоустановки, кВт	КПД по выработке электроэнергии
243,67	251,390	0,0310
411,10	425,792	0,0345
412,59	427,387	0,0346

Описанные исследовательские испытания не окончены, продолжается совершенствование технологических процессов. Коллектив предприятия видит перспективность разработанных и реализованных в экспериментальных образцах ЭТК технических решений и нацелен в дальнейшем методично вести работы по наладке обоих вариантов.

К тому же между членами консорциума разработчиков достигнута договоренность о перевозке и монтаже образца ЭТК по переработке ТКО в Новочеркасск, на соседнюю производственную площадку, что позволит значительно ускорить работы по подготовке к проведению экологической экспертизы установок. ♦