

УДК 621.311.22

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА
В ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ГРУППЫ «REGIDESO»
В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ**

Ж.А. Манигомба, Н.Д. Чичирова, В.Б. Груздев

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
amanigomba@yahoo.fr**

***Аннотация:** В статье рассмотрена альтернативная замена нефтяного топлива на газ, получаемый из бытовых и промышленных отходов в республике Бурунди, показаны основные пути его получения. Предложены направления для решения проблемы дефицита первичных источников энергии. Переработка отходов городов и промышленных предприятий позволит решить также и экологические проблемы в республике.*

***Ключевые слова:** электростанция, биомасса, отходы, дефицит электрической энергии, пиролиз, экология.*

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -33-40

**PROSPECTS FOR THE USE OF THE PRODUCTS OF PYROLYSIS IN DIESEL
GENERATORS OF A COMPANY «REGIDESO» IN THE REPUBLIC OF BURUNDI**

Z.A. Manigomba, N.D. Chichirova, V.B. Gruzdey

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

***Abstract:** the article describes an alternative to replace oil fuel with gas produced from domestic and industrial waste in the Republic of Burundi, and the main way to obtain it. A way to solve the problem of deficit of primary energy sources, waste management in cities and industries while solving the ecological problems in the Republic.*

***Keywords:** power plant, biomass, waste, deficit of electric energy, pyrolysis, environment.*

Введение

На основе анализа работы дизель-генераторов промышленной группы “REGIDESO” можно сделать вывод, что они имеют весьма высокую эксплуатационную аварийность, повышенный расход дизельного топлива, поставка которого является чрезвычайно дорогостоящей для республики Бурунди. Поэтому разработка пиролизной установки и применение её в условиях энергетического кризиса в республике позволит повысить термодинамическую и экономическую эффективность работы имеющихся в эксплуатации дизель-генераторов промышленной группы “REGIDESO”.

Пиролиз твердых бытовых отходов

Под пиролизом твердых бытовых отходов (ТБО) принято понимать процесс термического разложения отходов, происходящий без доступа кислорода. В конечном результате данный процесс позволяет получить твердый углеродистый остаток и пиролизный газ. Пиролиз ТБО способствует созданию современных безотходных

технологий утилизации мусора и максимально рациональному использованию природных ресурсов. Этот метод утилизации ТБО считается намного безопаснее их сжигания. Однако даже не смотря на то, что процесс пиролиза гораздо более трудоемкий, чем сжигание мусора, данная технология является наиболее перспективной, поскольку во время пиролиза количество выбросов, попадающих в атмосферу, значительно меньше, чем при традиционном сжигании. Следовательно, при использовании технологии пиролиза существенно уменьшается загрязнение окружающей среды.

Количество образовавшихся в процессе пиролиза веществ напрямую зависит от начального состава ТБО и от текущих условий, при которых происходит сам процесс пиролиза.

Процесс пиролиза может протекать при разных температурах.

1. Низкотемпературный, при температуре 450–900 °С. При этом выход газа минимален, а количество твердого остатка, смол и масел максимально. С увеличением температуры процесса количество получаемого газа увеличивается, а количество смол и масел, соответственно, уменьшается.

2. Высокотемпературный, при температуре свыше 900°С. Выход газа при данном способе максимален, а выход смол минимален. При данном методе пиролиза образуется минимальное количество отходов.

На рис. 1 показана принципиальная схема пиролизной установки для переработки биомассы.



Рис.1. Принципиальная схема пиролизной установки для переработки биомасс

Главным элементом установки является реактор, где и происходит процесс пиролиза (сублимации, возгонки) ТБО. В холодильнике жидкие и твердые фракции процесса охлаждаются, а затем направляются в виде топлива в камеру подогрева ТБО, где отходы подвергаются процессу пиролиза с выделением пиролизного газа. Твердые фракции, наряду с жидкими, могут успешно применяться в качестве топлива для поддержания пиролизного процесса в реакторе.

Продукты пиролиза

Количество и химический состав продуктов пиролиза напрямую зависят от состава ТБО и температуры их разложения.

Из бытовых, промышленных и сельскохозяйственных отходов, переработанных при помощи процесса пиролиза, можно получить:

- электрическую энергию;
- тепловую энергию;
- печное топливо (аналог мазута);
- синтез-газ;

– пиролизный дистиллят.

Дальнейшая глубокая переработка пиролизного дистиллята дает возможность получать различные товарные топливные продукты, такие как дизельное топливо, бензин, керосин, мазут, солярное масло и т.д. На рентабельность дальнейшей переработки дистиллята существенно влияет вид и характеристики используемого сырья.

В состав пиролизного газа из ТБО в основном входят газы CO и H₂. Но в зависимости от метода получения пиролизного газа соотношение CO:H₂ варьируется от 1:1 до 1:3. В прямой зависимости от применяемого сырья и метода его переработки соотношение этих компонентов может изменяться в широких пределах.

Как правило, процентное содержание веществ в сыром неочищенном пиролизном газе следующее:

- CO – 11÷18%;
- H₂ – 12÷28%;
- CH₄ – 33÷45%;
- CO₂ – 1,5÷2,5%.

В табл. 1 приведен средний состав пиролизного газа, получаемого из ТБО.

Таблица 1

Средний состав получаемого пиролизного газа из ТБО [1]

№ п/п	Состав пиролизного газа	Процентное содержание, %	Теплотворная способность (низшая), МДж/м ³
1	Метан (CH ₄)	33–45	35,80
2	Водород (H ₂)	12–28	10,80
3	Оксид углерода (CO)	11–18	12,64
4	Диоксид углерода (CO ₂)	1,5–2,5	–
Всего:			59,24

Из табл. 1 следует, что наиболее энергетическим газом является метан CH₄. Но после его выделения за счёт пиролиза ТБО он может направляться на установку сжижения, что весьма удобно для его использования как уже применяемого жидкого пропана. Процессы получения сжиженного метана из природного и из пиролизного газа технологически одинаковы.

Значение теоретически минимальной работы для его сжижения является функцией только первоначального состояния газа и конечного состояния жидкости и не зависит от вида применяемого процесса.

По известной формуле [2] можно определить теоретически минимальную работу сжижения метана:

$$W_r = T_0 \Delta S - \Delta h, \text{ кДж}, \quad (1)$$

где W_r – минимальная (или обратимая) работа, кДж; T_0 – температура окружающей среды, в которую может быть отведено тепло, °С; ΔS – уменьшение энтропии при переходе газа от начального до конечного состояния, кДж/кг·град; Δh – уменьшение энтальпии при переходе газа от начального состояния до конечного, кДж/кг.

Вычисленная по этой формуле теоретически минимальная работа, которая требуется для превращения метана, находящегося под давлением 34 кг/см² и при температуре 38 °С, в жидкость при атмосферном давлении и температуре -161,5 °С, составляет 117 кВт·ч/100 м³ сжиженного газа. Действительные же затраты работы будут находиться в пределах 285÷632 кВт·ч/100 м³ сжиженного газа и зависеть, главным образом, от цикла, используемого для сжижения.

Считают, что величина энергозатрат в 285 кВт·ч/100 м³ для получения сжиженного газа близка к экономически минимальному значению, что в нашем случае для тропического климата республики Бурунди просто неприемлемо.

Перспективы использования продуктов пиролизного процесса в энергетике республики Бурунди

В настоящее время в республике Бурунди эксплуатируются три дизельные электростанции “*Buja-1,2,3*”, которые при установленной электрической мощности в 20 МВт потребляют около 6000 кг дизельного топлива в час [3].

Все нефтепродукты в Бурунди закупаются в Танзании, Конго и Кении по стоимости одного килограмма более одного доллара. Таким образом, ежегодные затраты на дизельное топливо составляют около 50 млн. долларов. Отсюда 1,0 кВт·ч электроэнергии обходится в 0,36 \$ или 21,6 руб. при максимальном коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) = 0,80.

К сожалению, цены на нефть и нефтепродукты постоянно растут, особенно для энергодефицитных стран. Для решения столь острой проблемы правительство Бурунди предлагает несколько путей ее решения, одним из которых является использование пиролизной переработки бытовых, промышленных отходов и торфа.

Например, только суточная выработка ТБО в г. Бужумбура, столице Бурунди, с населением около 500 тысяч человек, составляет 0,52 кг на одного жителя города. Отсюда следует, что ежесуточное количество ТБО составляет около 260 тонн, при этом основная их доля (более 85%) – это отходы органического происхождения [4].

По оценкам специалистов возможный годовой объем органических отходов в 2017–2018 гг. может составить около 100 тысяч тонн только в столице Бурунди.

Не малый топливный ресурс в Бурунди составляет и торф, объем которого оценивается величиной около 600 миллионов тонн при возможном среднегодовом потреблении 5,8 миллиона тонн [5–7].

В свою очередь газификация бытовых, промышленных отходов и торфа в пиролизной установке, получение пиролизного газа и его применение в дизель-генераторах электростанций “*Buja-1,2,3*” позволит: уменьшить потребление дизельного топлива на 55–60% и, тем самым, частично решить экологические проблемы, а также сократить на 27–30 миллионов долларов ежегодные государственные расходы на закупку дизельного топлива для электростанций “*Buja-1,2,3*”.

Реконструкция дизель-генераторов под пиролизный газ

Для возможного применения пиролизного газа в конструкцию двигателя дизель-генераторов “*REGIDESO*” необходимо установить специальную периферийную топливную аппаратуру, но топливный насос высокого давления и дизельные форсунки сохраняются. Учитывая, что коэффициент сжатия и температура вспышки пиролизного газа и дизельного топлива резко отличаются, то для запуска двигателя и его дальнейшей работы в цилиндры подается «запальная» доза дизельного топлива около 25–30 % от номинального значения до реконструкции.

Для практических расчетов можно использовать гарантированную степень замещения в 70–75 % для двигателей с применением метана и 20–50 % – для пропана.

При этом КПД газодизельного двигателя выше, чем КПД исходного двигателя, примерно на 3–5 %. Это объясняется внешним смесеобразованием газодизельного двигателя, что дает возможность получения гомогенной смеси во всасывающем тракте. Это повышение КПД позволяет каждый сэкономленный литр дизельного топлива заместить примерно 1,0 нм³ метана.

Переделанный дизельный двигатель сохраняет возможность работы на дизельном топливе и при отсутствии пиролизного газа.

Но возможна реконструкция дизель-генераторов, при которой на переделанный дизельный двигатель устанавливается система зажигания (свечи зажигания), тогда газодизель превращается в газовый двигатель, работающий по циклу Отто [8–10]. В этом случае возможность работы на дизельном топливе отсутствует. В наших условиях второй вариант реконструкции неприемлем.

Оценка затрат на получение пиролизного газа для дизель-генераторов электростанции “Вија–1”

Для оценки возможного замещения жидкого топлива пиролизным газом для производства электрической энергии дизель-генераторами в качестве примера примем электростанцию “Вија–1”. В табл. 2 приведены её технические характеристики.

Таблица 2

Технические характеристики дизель-генераторов электростанции “Вија–1” [4]

Двигатели	
Модель	MTU16V4000G23, Германия
Количество, шт	4
Число цилиндров, шт	16
Расположение цилиндров	V-образное
Диаметр цилиндра, мм	170
Ход поршня, мм	210
Коэффициент сжатия	14:1
Рабочий объем цилиндра, л	76,3
Основная мощность, кВт (л.с.)	1798 (2411)
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1500
Удельный расход топлива при 1500 об/мин, г/(кВт·ч): – при 100% мощности:	199
Тип топлива	Дизельное, по сезону(ГОСТ 305-82)
Расход топлива, л/час	360
Расход масла на угар, % от расхода топлива, не более	0,5
Масляные фильтры	многоступенчатый масляный фильтр
Пусковое устройство	Электростартер, 24 В
Объем системы смазки, л	260
Объем системы охлаждения, л	200
Минимальная температура запуска, °С	-44
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	2865x1660x1810
Масса двигателя, кг	7700
Ресурс до капитального ремонта, ч	30 000
Генератор	
Количество	4
Полная мощность S_n , кВА	2000
Активная мощность P_n , кВт	1600
Установленная мощность электростанции, МВт	6,4
Частота тока, Hz	50
cos φ	0,8
Напряжение генератора, кВ	10
Напряжение после трансформации, кВ	30
Сила тока, А	115
Система охлаждения	IC01
Система исполнения	IP23

Из паспортных данных дизель-генераторов (табл. 2) известно, что потребление дизельного топлива на один дизель-генератор составляет 0,199 л/кВт·ч.

Отсюда потребность в топливе на установленную мощность в 1798 кВт составит $1798 \text{ кВт} \times 0,199 \text{ л/кВт}\cdot\text{ч} = 357,8 \text{ л/ч}$, а в сутки – 24 час. $\times 357,8 \text{ л/ч} = 8587$ литров для одного дизель-генератора.

Определим, сколько нужно биотоплива в виде торфа, рисовой соломки или другого биотоплива, чтобы заменить дизельное топливо на пиролизный газ из газогенератора для одного дизель-генератора мощностью 1798 кВт типа “MTU”.

Известно, что калорийность растительной биомассы в виде брикетов составляет 20,5 МДж/кг (5,7 кВт), для получения электрической мощности 2,0 кВт требуется 1,0 м³ природного газа с калорийностью около 31,8 МДж/кг (8,8 кВт).

Калорийность дизельного топлива составляет 42,7 МДж/кг (12,0 кВт). Также известно, что 1,0 м³ пиролизного газа по энергетической способности эквивалентен 0,61 л дизельного топлива. Отсюда 1,5 м³ пиролизного газа может заменить 1,0 литр дизельного топлива.

Нам нужно выполнить замещение 85% дизельного топлива в дизель-генераторе, что составляет 7299 литра от суточного расхода в 8587 литров.

Объем в 7299 л/сутки дизельного топлива соответствует 10949 м³/сутки пиролизного газа из растительного биотоплива (брикеты).

Из 1,0 тонны растительной биомассы можно получить 258,7 м³ пиролизного газа с калорийностью 4300–5500 ккал/кг (18–20 МДж/кг или 5,0 кВт). Отсюда следует, что для получения 10949 м³ пиролизного газа необходимо биомассы в размере 42 т/сутки.

Для четырёх дизель-генераторов MTU это составит 168 т/сутки растительной биомассы.

Для выполнения этих работ предлагается применить уже действующие российские пиролизные заводы-комплексы, которые, в зависимости от объема и вида сырья, позволяют переработать в сутки 250–400 тонн биотоплива растительного происхождения.

В результате пиролиза, помимо газа, из 1,0 тонны биотоплива можно дополнительно получить следующие коммерческие продукты:

- 1) 150–200 кг древесного угля с калорийностью 5000–5500 ккал/кг, который можно успешно применять опять в пиролизной установке для поддержания непрерывного процесса пиролиза и, тем самым, сократить расходы биотоплива на 25–30%;
- 2) 240 кг синтетической нефти в качестве топлива;
- 3) 120 кг полукокса для применения в быту и промышленности.

Эксплуатация установки

В течение первого года эксплуатации после пуска в работу газогенератор необходимо очищать ежемесячно.

Техническое обслуживание проводить ежемесячно, а технический осмотр – ежеквартально. Внутреннюю очистку – не реже 1 раза в год.

Содержание золы и смолы должно быть не более: 25 мг смолы/м³; 20–30% золы/т; 250 кг древесного уксуса/т.

На рис. 2 показана предлагаемая схема компоновки пиролизной установки с четырьмя дизель-генераторами, которая позволит оптимизировать пиролизный процесс и эксплуатацию установки.

При аварийном останове пиролизной установки *I* суммарного запаса пиролизного газа в газгольдерах *З* составляет 10-суточный резерв, что вполне приемлемо в условиях успешной эксплуатации установки.

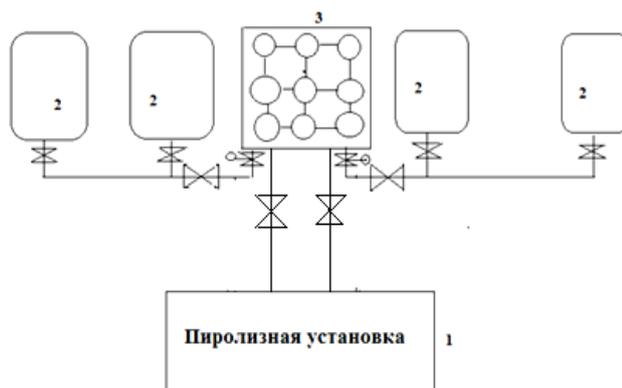


Рис. 2. Пиролизная установка с четырьмя дизель-генераторами:
1 – пиролизная установка; 2 – дизель-генераторы; 3 – газгольдеры

Выводы

Реконструкция дизель-генераторов промышленной группы “REGIDESO” на газодизель позволит:

- 1) частично решить кризисную ситуацию в энергетическом комплексе республики Бурунди и её экологическую безопасность;
- 2) за счет получаемых при пиролизе сопутствующих фракций процесса в виде древесного угля, полукокса и синтетической нефти решить топливную проблему в бытовом секторе республики;
- 3) повысить моторный ресурс дизель-генераторов, а также на 70–75 % уменьшить расход дизельного топлива и, тем самым, уменьшить себестоимость отпускаемой электроэнергии в 2,0–2,5 раза;
- 4) увеличить ресурс двигателя за счет снижения давления в нагнетателе жидкого топлива высокого давления, так как система оснащена датчиками слежения температуры отработавших газов, что позволяет не допускать перегрева двигателя и, тем самым, избежать его детонации;
- 5) увеличить срок службы дизельных форсунок, так как объем прохождения дизельного топлива через форсунки в газодизельном режиме уменьшается в два и более раз, соответственно и уменьшается негативное воздействие топлива на форсунки (эрозия, шлакование, засорение);
- 6) сохранить мощность двигателя (хотя при необходимости можно увеличить его крутящий момент);
- 7) создать источники двойного топлива, так как при аварийном прекращении подачи пирогаза автоматически переключается топливная система на дизельное топливо;
- 8) обслуживать газодизельную установку без покупки специальных запасных частей, так как все запчасти к двигателю остаются штатными.

Литература

1. <http://www.neroaera.com/p=38.2017>.
2. Rapport de production d’électricité entre 1996–2014 / service équipement électricité de la REGIDESO 2015 P. 15–16.
3. Манигомба Ж.А., Чичирова Н.Д. Организация электроэнергетики республики Бурунди // Труды Академэнерго. 2015. №4. С 121.
4. Манигомба Ж.А., Чичирова Н.Д. Перспективы применения органических и промышленных отходов в энергетике республики Бурунди // Труды Академэнерго. 2017. № 2. С 107.
5. Rapport du CTB 2013. P. 12–13.
6. Etude diagnostique de secteur de le n’эnergie au Burundi dans le cadre de l’initiative du secrétaire générale des nations unies de l’эnergie durable pour tous. Juin 2013. P. 15.

7. National encyklopedia.com Energy and power in Burundi 2014.
8. Thermique générale de I. CHVETZ, M. KONDAK et autres, Edition MIR. Moscou. 1969. P. 20–35.
9. Equipement thermique des usines germinatrices d'énergie électrique de J. RICARD. Troisième édition. DUNOD. Paris. 1962.
10. Guide d'exploitation des chaudières, Matériels – Equipements, Automatismes-pollution, Sécurité – Economie de René Malicet, deuxième édition revue et complétée. Masson Editeur. 120, Bd Saint Germain 75006 Paris 1980.

Авторы публикации

Манигомба Жан Альберт – аспирант кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: amanigomba@yahoo.fr.

Чичирова Наталья Дмитриевна – д-р хим. наук, профессор, директор Института теплоэнергетики, заведующая кафедрой «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ndchirova@mail.ru.

Груздев Вячеслав Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС), Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: laktarius@yandex.ru.

References

1. <http://www.neroaera.com/p=38>. 2017.
2. Rapport de production d'électricité entre 1996–2014 / service équipement électricité de la REGIDESO 2015 P. 15–16.
3. Manigomba Zh.A., Chichirova N.D. Organizatsiya elektroenergetiki respubliki Burundi // Trudy Akademenergo. 2015. №4. S 121.
4. Manigomba Zh.A., Chichirova N.D. Perspektivy primeneniya organicheskikh i promyshlennykh otkhodov v energetike respubliki Burundi // Trudy Akademenergo. 2017. № 2. S 107. Rapport du CTB 2013. P. 12–13.
5. Etude diagnostique de secteur de l'énergie au Burundi dans le cadre de l'initiative du secrétaire générale des nations unies de l'énergie durable pour tous. Juin 2013. P. 15.
6. National encyklopedia.com Energy and power in Burundi 2014.
7. Thermique générale de I. CHVETZ, M. KONDAK et autres, Edition MIR. Moscou. 1969. P. 20–35.
8. Equipement thermique des usines germinatrices d'énergie électrique de J. RICARD. Troisième édition. DUNOD. Paris. 1962.
9. Guide d'exploitation des chaudières, Matériels – Equipements, Automatismes-pollution, Sécurité – Economie de René Malicet, deuxième édition revue et complétée. Masson Editeur. 120, Bd Saint Germain 75006 Paris 1980.

Authors of the publication

Zhan Albert Manigomba – postgraduate student of the department "Thermal power stations", Kazan State Power Engineering University.

Natalia D. Chichirova – Director of the "Institute of Heat Power Engineering", Head of the Department "Thermal Power Plants", Doctor of Chem. Sci., Professor, Kazan State Power Engineering University.

Vyacheslav B. Gruzdev – Associate Professor of the Department "Thermal Power Plants", Cand. Tech. Sci., Kazan State Power Engineering University.