
УДК 621.313.1,533.9

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВОК ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ

© 2021 г. А. А. Сафронов¹, Ю. Д. Дудник¹, *, В. Е. Кузнецов¹,
В. Н. Ширяев¹, О. Б. Васильева¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики
и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Поступила в редакцию 06.08.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

В работе рассматриваются вопросы организации плазмохимической переработки органосодержащих веществ в автономном режиме с целью получения энергии. Описаны используемые в составе установки конструкции плазмотронов переменного тока мощностью до 500 кВт и системы их электропитания. Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на получение сингаза в процессе плазменной газификации отходов древесины, описание и характеристики оборудования необходимого для создания автономной энергоустановки на базе плазмотронов переменного тока.

Ключевые слова: плазмотрон, источник питания, автономная энергетика, плазмохимическая переработка, синтез газ

DOI: 10.31857/S0002331021020126

ВВЕДЕНИЕ

С целью улучшения экологической ситуации в стране, создания энергоэффективной экономики, отвечающей все возрастающим требованиям общества и государственной политики в сфере возобновляемой энергетики, проблема переработки отходов стоит как нельзя остро. Одним из определяющих направлений в решении данной проблемы является разработка, производство и широкое практическое внедрение отечественных средств автономной энергетики.

Ключевую роль в автономных системах энергообеспечения могут играть установки, в основу работы которых положены местные ресурсы, а именно: ТБО, сельскохозяйственные отходы, древесные отходы и др. Создание серийных энергетических систем на базе газопоршневых агрегатов или микротурбин будет способствовать внесению ощутимого вклада в развитие отечественной автономной энергетики.

В настоящее время Россия существенно отстает по удельным показателям потребления энергоресурсов [1]. Так как запас ископаемых топливно-энергетических ресурсов не безграничен, перевод экономики на энергоэффективный путь необходимо реализовать в обозримом будущем, что уже успешно происходит в других индустриально развитых странах. Для этого необходим рациональный подход к расходованию ресурсов в производственных сферах и использование новых альтернативных источников энергии, в первую очередь возобновляемых и местных топливно-энергетических ресурсов.

Особое значение в настоящее время приобретают автономные системы электропитания, способные работать на возобновляемых источниках; их использование приведет к уменьшению затрат на производство энергии и поэтому к увеличению эффективности различных сфер экономической деятельности. Рост количества ветровых, солнечных электростанций, использование биогаза в энергетике и т.д. показывает наличие интереса в мире к применению альтернативных источников энергии.

Можно предположить, что страны Европейского Союза стремятся развивать собственный топливно-энергетический комплекс, альтернативные способы получения энергии по ряду объяснимых причин, в первую очередь, для уменьшения своей зависимости от поставок энергоресурсов из-за рубежа, во-вторых, для улучшения экологической ситуации.

На данный момент в России существуют отдельные регионы, в которых дефицит электроэнергии является серьезной проблемой, требующей безотлагательного решения.

Соответственно, экономически оправданное развитие распределенной энергетики, в качестве ключевой меры по ликвидации дефицита энергии, приведет к спросу на автономные устройства генерации, работающие на базе местных топливно-энергетических ресурсов.

В период ограниченного количества финансовых средств и инвестиционной нестабильности в целом, значительная часть проблем с электроснабжением может быть решена за счет создания локальных систем генерации энергии. В этом случае использование автономных или возобновляемых источников может быть связано с меньшими затратами, чем подключение к централизованной энергосистеме.

Однако отечественного оборудования в случае реализации этого способа в достаточном количестве нет, зарубежные поставки негативно скажутся на его стоимости для внутреннего потребителя.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день в нашей стране разработаны новые альтернативные методы получения энергии [2, 3], обеспечивающие конкурентоспособность создаваемых технологий по отношению к технологиям, использующим органические ископаемые топлива.

ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ

Одной из возможных технологий производства электроэнергии и тепла при переработке отходов является технология получения на первой стадии энергетического газа, а на второй – сжигание данного газа в мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя с одновременным производством электрической и тепловой энергии [4].

Широко распространены следующие термические технологии получения энергетического газа: газификация и пиролиз. При пиролизе (нагрев без доступа окислителя) возможно получение сингаза с теплотворной способностью до 5000 ккал/м³ [5].

Синтез-газ является не только ценным химическим сырьем, он может быть использован в качестве альтернативного вида топлива.

При переработке биомассы необходимо осуществление процесса получения сингаза экологически безопасными методами, и получаемый газ должен обладать достаточным уровнем теплосодержания, что позволит использовать его для производства тепловой и электрической энергии.

Использование плазменных систем для получения синтез-газа позволяет значительно повысить эффективность и экономическую привлекательность этой технологии за счет глубокой деструкции сырья при одновременном уменьшении объема отходящих газов; более высокой скорости химических процессов в реакторе за счет высокой термической и химической активности низкотемпературной плазмы, а также высокой экологической безопасности процесса, достигаемой за счет физических па-



Рис. 1. Основные пути термохимической конверсии твердой биомассы [6].

раметров проведения процесса и использования специальных технических мер, камер дожигания и закалки.

Технология термической конверсии биомассы для получения газа с высокими теплотехническими характеристиками разрабатывается в ФГБУН Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН [2, 3, 7–9]. Большие научно-практические заделы в области плазмохимической переработки биомассы сделаны, в частности, разработана новая технология переработки и газификации органосодержащих отходов с получением сингаза с калорийностью не менее 1400 ккал/м^3 , который может быть непосредственно использован в виде топлива в современных энергетических агрегатах, рассчитанных на высокие тепловые нагрузки, или использоваться для получения жидкого биотоплива. Разработана также технология двухстадийной термической конверсии биомассы в синтез-газ, сочетающая пиролиз и высокотемпературный крекинг летучих соединений, и технология низкотемпературного пиролиза биомассы, позволяющая переходить к промышленному выпуску наукоемких энерготехнологических когенерационных комплексов для производства из отходов нового вида кондиционного твердого биотоплива с высокими теплотехническими и потребительскими свойствами (торрефицированных топливных пеллет).

Принципиальная схема экспериментальной установки плазмохимической газификации органосодержащих отходов, разработанной в ИЭЭ РАН, представлена на рис. 2.

Плазменный реактор-газификатор работает по обращенной схеме, т.е. вещество подается в реактор сверху, туда же подается поток воздушной плазмы, а полученный газ отводится из нижней части реактора. Таким образом, обрабатываемое вещество

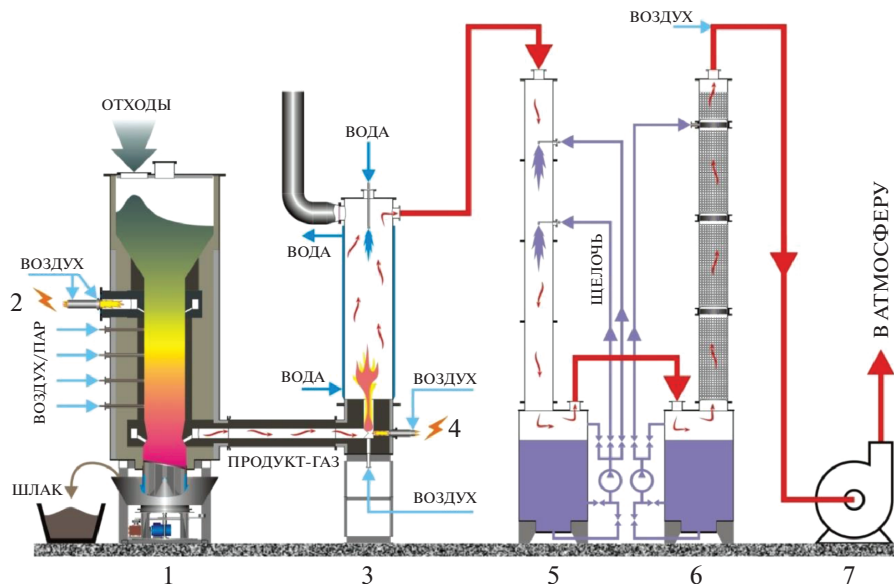


Рис. 2. Экспериментальная установка плазменной газификации отходов: 1 – реактор-газификатор обращенного типа; 2 – генератор плазмы (до 50 кВт); 3 – дожигатель; 4 – дежурный факел; 5 – скруббер распылительный; 6 – скруббер насадочный; 7 – вытяжной вентилятор.

попадает сначала в зону окисления, где оно подвергается крекингу и частично сгорает. В нижней зоне восстановления водяные пары и CO_2 восстанавливаются до CO и H_2 , после чего полученный газ через газоход поступает в дожигатель, при этом температура газа на выходе до поступления в газоход составляла $\sim 1200^\circ\text{C}$. Расход плазмообразующего вещества (воздушной плазмы) подбирался таким образом, чтобы время контактов с плазмой составляло величину порядка ~ 1.5 с.

Один или два высоковольтных плазмотрона размещаются в верхней части реактора. Мощность плазмотронов менялась от 10 до 50 кВт, среднемассовая температура газа 1700°C , расход газа 2.3–2.9 г/с. Максимальная производительность установки составляет 50 кг/ч обрабатываемого вещества.

В таблице 1 приведено сравнение основных параметров установки при газификации отходов древесины.

Технология позволяет осуществить эффективную безотходную переработку местных топливно-энергетических ресурсов, в первую очередь древесных и сельскохозяйственных отходов, торфа с получением высококалорийного сингаза, который непосредственно может быть эффективно использован для производства электрической и тепловой энергии, в том числе в мини-ТЭЦ.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОТРОНОВ В УСТАНОВКАХ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

Основой плазмохимической установки получения сингаза является плазмотрон. Преимущества использования плазмотрона в том, что его использование обеспечивает практически полное разложение органической части отходов с образованием минеральных веществ и полное обеззараживание неорганической части, что позволяет еще и сократить объем остатков, подлежащих захоронению в 50–400 раз.

Таблица 1. Основные параметры экспериментальной установки, полученные при газификации отходов древесины

Параметр сравнения		Единица измерения	Эксперимент	
			1	2
Глубина превращения	С	%	76.5	71.5
	Н		84.2	86.3
Теплота сгорания сингаза		МДж/м ³	5.84	5.96
		МДж/кг	6.23	6.24
Удельные энергозатраты	на 1 кг сырья	кВт ч/кг	0.84	0.55
	на 1 м ³ газа	кВт ч/м ³	0.28	0.18

Хорошо известно, что ионизованные частицы плазмы сами являются химически активными и способны генерировать химически активные частицы (радикалы) при столкновении с нейтральными молекулами. При временах подвода плазмы к зоне реакции меньших, чем время жизни радикалов, можно ожидать существенную интенсификацию химических процессов [10]. Более высокая среднемассовая температура в плазмохимическом реакторе способствует и повышению температуры стенок. В результате этого уменьшается количество не прореагировавшего вещества или количество побочных продуктов вследствие исчезновения более холодных зон вблизи стенок. Подача в реактор горячего, а не холодного (как при сжигании), воздуха уменьшает объем холодных (не реакционных) зон внутри реактора.

Поэтому широкое применение плазменных генераторов для ввода энергии в процессах пиролиза и переработки различного сырья (отходов) с целью обезвредить их или, например, для получения топлива для нужд экологически чистой возобновляемой энергетики может привести к созданию высокоэффективной хозяйственной отрасли, направленной на улучшение условий и качества жизни населения.

Использование плазменного нагрева позволяет получить температуру в камере дожигания 1200–1400°C при времени пребывания дымовых газов ~2 с с минимально возможным увеличением объема отходящих газов, т.к. является альтернативой применению чистого кислорода в составе дутья. Это достаточно для обезвреживания с высокой эффективностью токсичных продуктов (Cl₂, C₂F₄, CF₄, C₂F₆, SO₂, H₂S и др.), в том числе и галогенсодержащих, до вида CO₂, H₂O, HCl, HF, SO₂.

В ИЭЭ РАН был создан ряд трехфазных плазмотронов переменного тока, предназначенных для работы в составе плазмохимического реактора для уничтожения твердых отходов, и плазмохимического реактора для уничтожения жидких и газообразных отходов.

1.1. Со стержневыми электродами

Многофазный электродуговой плазмотрон переменного тока со стержневыми водоохлаждаемыми электродами для работы на инертных, окислительных и восстановительных средах [11, 12] мощностью от 10 до 50 кВт представлен на рис. 3.

Высоковольтный трехфазный плазмотрон переменного тока состоит из следующих составных частей: корпуса 1, проходных изоляторов 2, сменных наконечников – электродов 3. Корпус выполнен из нержавеющей стали и имеет водяное охлаждение. В корпусе расположены три сходящихся цилиндрических канала, выходящих к соплу. В каждом канале имеется тангенциальный вдув газа, который поступает из общей камеры, выполненной в виде кольца на наружной поверхности корпуса. Проходной изолятор представляет собой конструкцию, сваренную из нержавеющей стали и име-

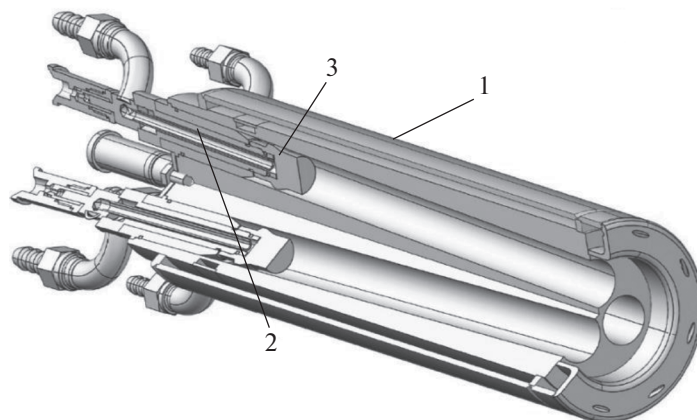


Рис. 3. Высоковольтный трехфазный плазмотрон переменного тока: 1 — корпус, 2 — изолятор, 3 — электрод.

ющую водяное охлаждение и закрепленную снаружи втулкой-изолятором. Сменные наконечники-электроды изготовлены из сплава железа и меди методом порошковой металлургии.

Данный тип плазмотронов предназначен для работы на окислительных и инертных средах (воздух, аргон, углекислый газ), ток дуги до 35 А (зависит от источника питания), падение напряжения на дуге 800–1200 В (в зависимости от модификации), расход газа от 1 до 30 г/с.

1.2. С рельсовыми электродами

Высоковольтный плазмотрон переменного тока с рельсовыми электродами [12] представлен на рис. 4.

Конструктивно он состоит из двух модулей: заднего (электродного) и переднего (соплового). Корпуса обоих модулей выполнены из нержавеющей стали и охлаждаются водой. В каждом из модулей имеется по два кольцевых контура тангенциальной газовой подачи. Электродный модуль имеет форму усеченного конуса, в его тыльной части установлен высоковольтный плазмотрон-инжектор, выходное сопло которого направлено в зону минимального промежутка между основными электродами. Сопловой модуль имеет цилиндрическую форму и заканчивается выходным соплом.

Электроды имеют изогнутую форму и могут быть выполнены из медного прутка. На каждом электроде есть два штуцера с резьбой, они позволяют зафиксировать положение электрода в разрядной камере плазмотрона. Электрод вводится этими штуцерами в две параллельно вставленные в корпус камеры электроизолирующие втулки, где к ним крепятся два ответных штуцера со шлангами системы охлаждения, введенные с наружной стороны корпуса. Таким образом, установленный электрод имеет одну степень свободы для перемещения в радиальном направлении, ограниченную регулировочным болтом, расположенным между штуцерами с наружной стороны корпуса. Это позволяет изменять межэлектродный зазор по желанию пользователя в рабочем режиме без переналадки и снятия силового питания с плазмотрона. Крепление токоподводящей шины на каждом из электродов осуществляется на штуцере, расположенном ближе к инжектору.

Принцип электродинамического движения дуг в поле собственного тока (рельсотронный эффект) лежит в основе работы плазмотронов с электродами рельсового ти-

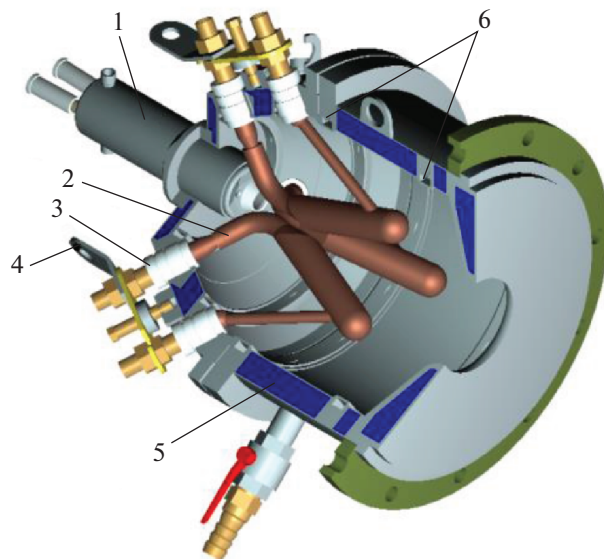


Рис. 4. Высоковольтный трехфазный плазмотрон переменного тока: 1 — инжектор; 2 — основной электрод; 3 — изолятор; 4 — токоввод; 5 — водоохлаждаемый корпус; 6 — контуры тангенциальной газовой подачи.

па. Быстрое перемещение точки привязки дуги по электроду под действием электродинамических и газодинамических сил распределяет тепловую нагрузку по длине электрода.

ПИТАНИЕ ПЛАЗМОТРОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В связи с разработкой новых энергоэффективных плазменных технологий по переработке органосодержащих веществ в сельскохозяйственной, газовой и нефтедобывающей отраслях появляется необходимость использования автономных источников электропитания для плазмотронов переменного тока, если в местах переработки продукта отсутствует стационарная электросеть.

Плазмотрон переменного тока является нелинейной нагрузкой для источника питания, параметры которой (мощность, падение напряжения, ток, пульсации токов и напряжений) зависят от многих факторов (изменения расхода газа, режима горения дуги, рабочих параметров, геометрических размеров электродуговой камеры и т.д.).

Это предъявляет специфические требования к источнику питания, например, требует наличия регулирующего элемента, обеспечивающего стабильность работы, возможность обеспечения требуемого уровня мощности и поддержания устойчивого горения дуги во время перехода тока через ноль.

Стандартная система питания состоит из силового трансформатора и токоограничивающих реакторов, включенных в каждую фазу. Реактор необходим для стабилизации режима горения дуги. В отличие от балластного резистора в реакторе практически отсутствуют потери активной мощности, а применение емкостного компенсатора позволяет создать установку с $\cos \varphi = 1$.

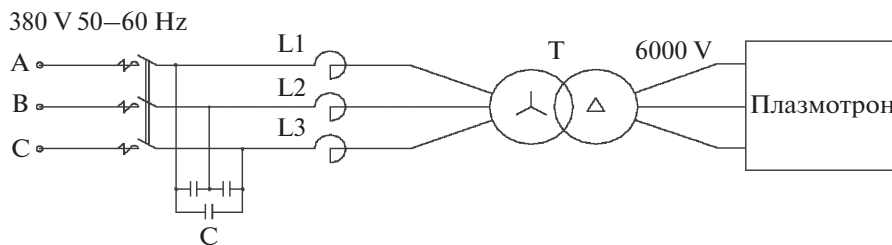


Рис. 5. Схема источника питания трехфазного плазмотрона с торцевыми электродами: А, В и С – клеммы подключения к питающей сети; L1–L3 – токоограничивающие реакторы; Т – повышающий трансформатор; С – компенсатор реактивной мощности.

Основными параметрами, которые необходимо рассчитать и выбрать, являются: вторичное напряжение холостого хода трансформатора, мощность трансформатора, номинальный ток дросселя, индуктивное сопротивление дросселя.

Напряжение холостого хода трансформатора выбирается исходя из устойчивости горения дуги в камере плазмотрона при различных расходах газа. U_{xx} должно быть достаточно велико, чтобы покрывать случайные колебания напряжения дуги. Устойчивая работа трехфазных плазмотронов со стержневыми электродами обеспечивается при коэффициенте мощности $\cos \varphi_{пл} \sim (0.3–0.6)$ [13].

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ТОРЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Принципиальная электрическая схема источника питания плазмотрона переменного тока с торцевыми электродами представлена на рис. 5.

В представленном источнике питания используется промышленный трансформатор ТМ250: напряжение первичной обмотки 380 В, напряжение вторичной обмотки 6000 В. Для обеспечения падающей ВАХ и номинального тока вторичной и первичной обмоток в цепь первичной обмотки включены токоограничивающие реакторы.

Для обеспечения $\cos \varphi = 1$ параллельно системе питания подключен компенсатор реактивной мощности.

Характеристики источника питания:

- ток короткого замыкания первичной обмотки – 25 или 33 А (регулируется путем изменения индуктивности токоограничивающих реакторов);
- ток вторичной обмотки 300, 400 А;
- напряжение холостого хода вторичной обмотки 6000 В при напряжении первичной обмотки 380 В;
- $\cos \varphi = 1$ некомпенсированного источника питания – 0.3.

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ПЛАЗМОТРОНА С РЕЛЬСОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Принципиальная электрическая схема источника питания представлена на рис. 6.

Слева клеммы подключения к питающей сети (А, В и С); справа – к токовводам электродов плазмотрона (сверху) и инжектора (снизу); L1–L3 – токоограничивающие реакторы; Т – трансформатор питания инжектора; С1 и С2 – компенсатор реактивной мощности инжектора и основных дуг соответственно.

Технические характеристики системы питания:

- напряжение питающей сети 480–520 В;
- напряжение холостого хода источника питания 480–520 В;

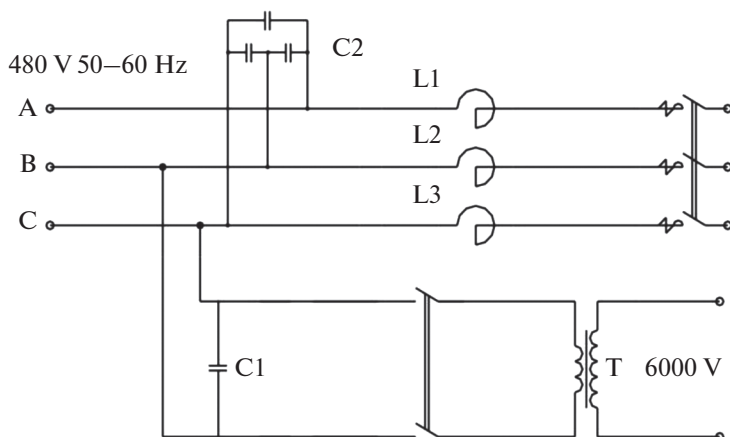


Рис. 6. Схема источника питания трехфазного плазмотрона с рельсовыми электродами.

- $\cos\varphi$ системы 0.3–0.7;
- номинальный рабочий ток при падении напряжения на реакторе 190 В может принимать значения 500, 700, 1000, 1500 А в зависимости от коммутации перемычек;
- напряжение первичной обмотки трансформатора инжектора – 480 В;
- напряжение вторичной обмотки трансформатора инжектора в режиме холостого хода – 6000 В;
- ток первичной обмотки – 110 А;
- ток вторичной обмотки – 7 А.

Описанная выше система питания может подключаться к заземленному источнику – понижающему трансформатору с обмотками низкого напряжения (220, 380, 480 В), соединенными звездой с заземленной нейтральной точкой; либо к гальванически развязанному от земли источнику – понижающему трансформатору с обмотками низкого напряжения (220, 380, 480 В), соединенными звездой без выведения нейтрали или соединенными по схеме треугольник.

Т.е. для электропитания плазмохимической установки необходимо стандартное промышленное напряжение 380 В с обеспечением требуемой мощности.

Рассмотрим описание некоторых силовых агрегатов, которые могут быть использованы для создания автономных систем питания плазменных установок и выработки полезного продукта.

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ПЛАЗМОТРОНОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Такие источники питания могут быть созданы, например, на базе дизельных (газопоршневых) или микротурбинных двигателей. Естественно, что выбор привода зависит от многих факторов, наиболее значимыми из которых являются мощность энергетической установки, вид топлива и его характеристики.

Газопоршневой двигатель в качестве привода электрогенератора обладает следующим рядом качеств: достаточно высокий КПД и мобильность, сравнительно невысокая стоимость оборудования и эксплуатационных затрат, простота обслуживания.

При этом лучшие экономические показатели демонстрируют установки, оснащенные теплообменными агрегатами для утилизации тепла (мини-ТЭЦ) [14]. Если коэф-

фициент использования топлива электростанций на базе газопоршневого двигателя составляет 32–35%, то для мини-ТЭЦ (установок с когенерацией тепла) – 82–85%.

Поэтому важнейшую роль играет принцип комбинированной генерации (когенерации) энергии. При этом электроэнергия и тепло вырабатываются совместно в одной установке, вместо отдельной выработки в разных системах. Преимущества принципа когенерации: высокая энергоэффективность, экономичность, сокращение выбросов и уменьшение нагрузки на централизованные энергосети.

Очевидно, что именно двигатель в значительной степени определяет рентабельность всей системы. В идеале, двигатель – это агрегат, работающий на газообразном топливе (природный газ, сингаз и др.) с возможностью работы в режиме стехиометрического сгорания и при обедненных смесях. Стехиометрическое сгорание подводит столько воздуха, сколько необходимо для сгорания. Двигатели на обедненных смесях работают, напротив, с избытком воздуха, что обуславливает наличие остаточного кислорода в отработанных газах после сгорания в цилиндрах. Электрическая мощность от 50 кВт до 1000 кВт, что вполне достаточно для питания плазмотронов переменного тока, установленных на установке по плазменной деструкции отходов и выработки энергии для нужд потребителя.

Несмотря на высокую перспективность использования, достаточного количества отечественного оборудования данного класса нет. На российском рынке сегодня представлены, в основном, агрегаты иностранных компаний (Jenbacher, Caterpillar, Deuts, Tedom и др.) [15].

При этом импортные агрегаты обладают двумя существенными недостатками: высокой удельной стоимостью и проблемами с сервисным обслуживанием и ремонтом.

Среди отечественных производителей наиболее приемлемым является использование дизельных двигателей Ярославского моторного завода, мощностью 60, 100, 200 и 315 кВт, конвертируемых в газопоршневые агрегаты. Выпуск мини-ТЭЦ этого ряда мощностей освоен в настоящее время группой компаний “Малые газопоршневые станции” (ГК “МГС”, Москва) на базе технической документации НАТИ, собственных разработок и исследований Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) [16, 17].

Микротурбинная генераторная установка представляет собой комплект оборудования на базе газовой турбины мощностью до 1 МВт, позволяющего обеспечить выработку электрической и тепловой энергии.

Среди производителей этого оборудования на российском рынке представлены в основном американские производители – Capstone Turbine Corporation, Calnetix Power Solution, Ingersoll (США), а также Turbec (Швеция), Elliott, Toyota.

Более 70% российского рынка, насчитывающего около 400 установок, принадлежит оборудованию фирмы Capstone. Еще около 100 установленных в России микротурбинных установок приходится на фирму Calnetix.

Это объясняется тем, что микротурбинные установки Capstone имеют более широкую по сравнению с другими производителями линейку оборудования – от 30 кВт до 1 МВт.

Необходимо отметить простоту конструкции микротурбинной установки. Так двигатель фирмы Capstone [18] состоит всего из одной движущейся детали – вращающегося вала, на котором соосно расположены электрический генератор, компрессор и непосредственно турбина. В установке не используются редукторы или другие механические приводы, следствием чего является высокая надежность микротурбин. Уникальной конструктивной особенностью двигателя являются воздушные подшипники, которые удерживают вал ротора генератора на воздушной подушке.

Важное преимущество микротурбин – возможность использования различных видов топлива. Они могут работать не только на природном и сжиженном газе, дизельном топливе и керосине, но и на низкокалорийных и высокосернистых газах: попут-

Таблица 2. Требования к топливу

Наименование	Величина
Входное давление	0.2 до 0.3 бар (21 до 34 кПа)
Минимальная температура воздуха	1°C
Максимальная температура	79°C
Диапазон калорийности (индекс Воббе)	450–12000 ккал/нм ³

ном газе, шахтном газе и биогазе, в том числе с низкой теплотворной способностью (от 2500 ккал/м³) и высоким (до 7%) содержанием сероводорода.

Микротурбины Capstone также используются для решения проблемы утилизации биологических отходов. Объединенные с модулями анаэробной или пиролизной газификации биологических отходов, они позволяют практически полностью перерабатывать биогаз, полученный из различных бытовых и производственных отходов, и одновременно закрывать потребности в электроэнергии и тепле.

Несмотря на возможность использования разнообразных видов топлива, как указано выше, калорийность его должна быть достаточно высока. Тем не менее существуют системы, имеющие возможность работать с низкокалорийными газами.

Например, газотурбинные установки (микротурбины) фирмы FlexEnergy [19, 20]. Система основана на газотурбинных технологиях и термоокислителе с низким уровнем выбросов. Газотурбинная электростанция FP 250 способна генерировать энергию из низкокалорийных газов низкого давления, которые не могут быть утилизированы обычными способами. Термический окислитель в данной системе мощностью 250 кВт используется вместо камеры сгорания. В нем вырабатывается тепло, приводящее в движение турбину. Низкая температура окисления позволяет FP250 поглощать летучие органические соединения и СО без термического образования вредных выбросов. Топливо насыщается воздухом до окисления, благодаря чему FP250 обходится без внешней компрессии и может работать на потоке газа низкой концентрации, содержащем всего 5% метана. Высокая устойчивость к силоксанам значительно сокращает потребности в подготовке топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены конструкция экспериментальной плазмохимической установки, принципы организации плазмохимического процесса переработки органосодержащих веществ. Описаны используемые конструкции плазмотронов переменного тока мощностью до 500 кВт и системы их электропитания, пригодные для организации плазменного процесса переработки в широком диапазоне производительности.

Приведены описание и некоторые характеристики силового оборудования необходимого для создания автономной энергоустановки. Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на получение сингаза в процессе плазменной газификации отходов древесины. При этом теплота сгорания сингаза составила величину около 6 МДж/м³.

Это позволяет утверждать, что даже на опытной установке был получен сингаз с теплосодержанием достаточным для работы силового агрегата для выработки энергии. И, соответственно, существует реальная возможность использовать плазмохимическую технологию получения синтез газа на базе рассмотренных плазмотронов переменного тока с высокой экономической эффективностью и автономностью энергетического комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В. Энергетика России (избранные статьи, доклады, презентации). Т. 3: Мировая энергетика и Россия. М.: Энергия, 2014. 415 с.
2. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Васильева О.Б., Ширяев В.Н. Разработка и исследование возможности применения плазменного оборудования для получения синтез-газа // В сборнике: Семинар вузов по теплофизике и энергетике. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. 2019. С. 350–351.
3. Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н., Субботин Д.И., Образцов Н.В., Суров А.В., Попов В.Е. Применение плазмотрона переменного тока для переработки потенциально опасных веществ // Химия высоких энергий. 2018. Т. 52. № 4. С. 301–305.
4. Антропов А.П., Батенин В.М., Зайченко В.М. Новые технологии распределенной энергетики // ТВТ. 2015. Т. 53(1). С. 111–116.
5. Зайченко В.М. Переход к энергоэффективной экономике: проблемы и перспективы // Окружающая среда и энерговедение. 2019. № 3. С. 30–48.
6. Стратегическая программа исследований по биоэнергетике. М. 2018. 162 с.
7. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Kuznetsov V., Surov A.V., Popov S.D. Multi-phase AC plasma generators // Pulsed Power Plasma Science. 2001. С. 685–688.
8. Братцев А.Н., Попов В.Е., Рутберг А.Ф., Штенгель С.В. Установка для плазменной газификации различных видов отходов // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 832–837.
9. Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Попов В.Е., Уфимцев А.А. Плазменная газификация биомассы на примере отходов древесины // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 251–255.
10. Вурзель Ф.Б., Полак Л.С. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме // Химические процессы в плазме и плазменной струе. М.: “Наука”, 1965. С. 238–251.
11. Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н. Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 926–931.
12. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н. Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.
13. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы // М.: “Энергоатомиздат”, 1985. 153 с.
14. Наумов А.Л. МИНИ-ТЭЦ – очередной бум или объективная потребность отечественной энергетики // Журн. АВОК. 2005. С. 22–29.
15. VADO Technical Investment GmbH; www.vadogroup.com.
16. Зайченко В., Качалов В., Лавренов В., Лищинер И., Малова О. Получение синтез-газа из древесных отходов // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 11. С. 4–9.
17. Зайченко В., Крысанова К., Лавренов В. Метод и устройство пиролизической переработки отходов целлюлозно-бумажного производства в высококачественный синтез-газ // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22 № 11. С. 4–9.
18. <https://capstone.ru>.
19. http://www.r-gaz.ru/ingersoll_rand.html.
20. <https://www.flexenergy.com/>.

Autonomous Power Supplies for Plasma Processing Installations of Organ-Containing Substances

A. A. Safronov^a, Yu. D. Dudnik^{a, *}, V. E. Kuznetsov^a, V. N. Shiryayev^a, and O. B. Vasilieva^a

^a*Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

*e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

The paper deals with the organization of plasma-chemical processing of organic containing substances in an autonomous mode for energy generation. The designs of AC plasma torches with a power of up to 500 kW and their power supply systems used in the installation are described. The results of experimental studies aimed at obtaining of syngas in the process of plasma gasification of wood waste, description and characteristics of the equipment required for creation of an autonomous power plant based on AC plasma torches are presented.

Keywords: plasma torch, power supply, autonomous power engineering, plasma-chemical processing, synthesis gas