

**ОХРАНА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СВАЛОЧНОГО ГАЗА ПОЛИГОНОВ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ РОССИИ¹**

© 2023 г. Д. А. Агарков^a, С. И. Бредихин^a, С. В. Киселева^{b, c, *}, Д. В. Матвеев^a, А. В. Самойлов^a,
А. Б. Тарасенко^c, Ю. С. Федотов^a, Е. В. Ципис^a

^aИнститут физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН,
ул. Академика Осипьяна, д. 2, г. Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^cОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, корп. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принята к публикации 28.06.2022 г.

Проблема утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) стоит во всех странах мира. В России до настоящего времени основным остается полигонный способ захоронения таких отходов. Разложение отходов на полигонах, с одной стороны, вызывает недовольство населения вследствие выделения сероводорода, метана и других компонентов смеси, известной как “свалочный газ”. С другой стороны, эта смесь, содержащая до 40–60% метана, является ценным энергетическим сырьем. Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), имеющие высокую рабочую температуру, рассматриваются как перспективное устройство преобразования синтез-газа из углеводородных топлив в электрическую и тепловую энергию. В то же время в некоторых компаниях и лабораториях ведутся работы по созданию ТОТЭ с прямым окислением метана, что позволяет дополнительно повысить КПД преобразования благодаря отказу от паровой конверсии. Рассмотрены вопросы использования ТОТЭ для энергетической утилизации свалочного газа. За основу исследований взяты результаты экспериментов по подбору материалов топливных элементов и условий их эксплуатации, допускающих прямое преобразование модельных газовых смесей в электрическую энергию, а также зарубежного опыта очистки свалочного газа и оценки его объема на полигонах твердых коммунальных отходов в России. Полученные данные позволяют рассматривать утилизацию свалочного газа с применением ТОТЭ как перспективный рынок развития отечественных водородных технологий, расширение которого может способствовать повышению энергоэффективности и улучшению экологической ситуации в крупных городских агломерациях.

Ключевые слова: электрохимические генераторы, твердооксидные топливные элементы, лабораторная установка, вольт-амперная характеристика, твердые коммунальные отходы, свалочный газ, технический потенциал

DOI: 10.56304/S0040363623010010

Электрохимические генераторы (ЭХГ) на основе топливных элементов, особенно с твердооксидным электролитом, в течение длительного времени рассматриваются как перспективные системы генерации тепловой и электрической энергии, прежде всего в силу высокого КПД прямого преобразования химической энергии топлива [1]. При высокой рабочей температуре (800–1000°C) ТОТЭ мало чувствительны к примесям монооксида углерода (СО) в составе топливного газа, что позволяет использовать его как топливо [2]. Вме-

сте с тем для ТОТЭ характерна высокая чувствительность к некоторым другим примесям (соединениям хлора, кремния и серы) [3]. Во избежание осаждения твердого углерода на анодном электроде ТОТЭ в большинстве случаев природный газ или биогаз подвергаются реакции паровой конверсии, после чего полученный синтез-газ направляют в ТОТЭ [4]. Однако топливный процессор, реализующий реакцию паровой конверсии, забирает большую часть тепловой энергии, вырабатанной ЭХГ, и делает схему более сложной и дорогой. Поэтому в разных странах разрабатываются схемы прямого преобразования метана в ТОТЭ. В [5] рассмотрена работа микротрубчатых

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00478 от 03.06.2020 г.).

ТОТЭ на смесях, имитирующих биогаз, при КПД 18,5% и плотности тока 524 мА/см². При добавках кобальта в состав анодного катализатора увеличивается толерантность системы к примесям серы и науглероживанию анода. Помимо природного газа, источником метана может служить и свалочный газ, содержащий в своем составе 40–60% СН₄.

В последние годы проблема накопления ТКО на полигонах России с саморазложением и производным выделением свалочного газа приобрела заметный масштаб. В связи с этим в настоящее время применяются технологии обустройства полигонов для захоронения отходов, которые предусматривают создание герметичного саркофага для предотвращения попадания сточных вод в почву и подземные воды. В теле полигона имеются скважины и система трубопроводов для отведения биогаза на факел (сжигание) либо на полезную утилизацию. За рубежом широко распространены системы подачи биогаза от полигонов (свалочного газа, лэндфил-газа) после очистки в системы газоснабжения потребителей. Характеристика состава лэндфил-газа и методов его использования в энергетике, а также экономические аспекты проблемы рассмотрены в [6].

Утилизация бросового энергетического сырья в некоторых случаях выполняется с помощью газопоршневых установок, имеющих относительно высокий КПД (30–35% при работе на свалочном газе). Однако из-за высоких температур в их камерах сгорания происходит загрязнение атмосферы оксидами азота [6]. Поэтому ТОТЭ можно рассматривать как относительно эффективный и экологичный способ получения энергии из свалочного газа. При этом основные решаемые научно-технические проблемы связаны с очисткой свалочного газа от примесей и реализацией схемы прямого окисления метана.

Вопросы использования ТОТЭ при работе на продуктах газификации биомассы (в том числе свалочного газа) рассмотрены в [7]. Основной упор авторы делают на анализе допустимого состава примесей, отмечая малое количество экспериментальных работ на реальных или модельных газовых смесях. В связи с влиянием процесса переработки органического сырья на содержание примесей в топливном газе анализируются различные подходы к газификации биомассы.

В развитие данного исследования были выполнены эксперименты по фактическому использованию биогаза в ТОТЭ с несущим анодом (Ni-8YSZ/8YSZ/GDC + LSCF) [2]. При этом биогаз был получен из твердых коммунальных отходов, определен его состав и проведена его очистка от примесей с использованием углеродных сорбентов и оксидов щелочных металлов. Затем смесь аналогичного состава готовили с использованием баллонных газов. Показано, что для

ТОТЭ предельная концентрация сероводорода составляет 1 ppm (по объему), а присутствие в топливном газе кремнийорганических соединений недопустимо. В целях удаления диоксида углерода из выбросов ТОТЭ отходящие газы применяли в качестве сырья для роста микроводорослей, питательная среда для которых содержала продукты брожения твердых коммунальных отходов. Теоретически это позволяет еще более снизить нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов диоксида углерода после ТОТЭ.

Методы прямого использования биогаза в ТОТЭ (без предварительного риформинга) рассматривались в [2], где было показано, что наиболее пагубное влияние на ресурс ТОТЭ оказывает осаждение в них углерода и соединений серы. Для уменьшения этих отравляющих воздействий рекомендовано применять структурированные волокнистые анодные материалы на основе Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃ · 4H₂O с развитой поверхностью и контролировать соотношения содержания метана, диоксида углерода и водяного пара в топливном газе. Характеристики газовой смеси зависят от температуры, рабочего напряжения, разбавления топливного газа паром, добавки молибдена, меди, диоксида церия в состав анодного материала. Также отмечается, что в большинстве случаев обогащение метаном биогаза способствует уменьшению осаждения углерода. Рекомендуемый коэффициент использования топлива, по мнению авторов [2], должен составлять 0,25.

Обзор технологий очистки свалочного газа от примесей в целях получения электрической и тепловой энергии проведен в [8]. Обязательному удалению подлежат соединения серы (прежде всего сероводород), кремнийорганические соединения, галогениды и др. Средний по свалкам США, участвующим в программе утилизации свалочного метана, состав газа представляет собой смесь метана (50%), диоксида углерода (45%), кислорода, азота и других примесей (5%). Содержание кремнийорганических соединений в свалочном газе может достигать 67 мг/м³, в биогазе, образующемся при брожении сточных вод, – 417 мг/м³. Влияние сероводорода на характеристики ТОТЭ напрямую связано с рабочей температурой элемента. Так, при содержании сероводорода 1 ppm при 1000°C происходит обратимое падение рабочего напряжения на 9%, при 800°C снижение напряжения существенно больше и носит характер необратимой деградации [9].

Допустимое содержание примесей в топливном газе составляет, мг/м³:

H ₂ S.....	1
Кремнийорганические соединения.....	1
Галогениды.....	3

Методами очистки свалочного газа являются абсорбция, адсорбция, мембранное разделение и осаждение компонентов путем охлаждения газового потока. При охлаждении свалочного газа до 5–10°C происходит удаление из него влаги и уменьшение содержания кремнийорганических соединений на 10–50%. Основа очистки в настоящее время – адсорбция. Относительно новым является метод адсорбции кремнийорганических соединений при повышенных температурах (400°C) на оксидах алюминия, кремния, кальция и магния, хотя для двух последних характерно также усиленное поглощение диоксида углерода. В [8] показано, что высокой сорбционной способностью по кремнийорганическим соединениям обладает активированный уголь, однако он труднее всего поддается регенерации. Наиболее высокие показатели достигнуты на супергидрофобных полимерных сорбентах. Дополнительной особенностью этих недорогих материалов является потеря сорбционной емкости менее 10% за цикл при десяти циклах регенерации (нагрев на воздухе до 100°C).

Основным сорбентом для сероводорода являются пористые среды на базе оксида железа. В [10] приводится сорбционная емкость пористых сорбентов на основе оксида железа, равная 0.075 г серы/г вещества. Перспективной для практического применения представляется комбинация конденсации с несколькими сорбентами (активированным углем и соединениями железа или алюминия), так как каждый из сорбентов обычно улавливает свою целевую примесь.

Многоступенчатая очистка была реализована в проекте DEMOSOFС [11]. В данном случае на первой ступени очистки проводилось охлаждение биогаза водой до 5–10°C, на второй ступени – сорбция на активированных углях, специально подобранных для удаления кремнийорганических соединений, а также следов сероводорода. После очистки давление биогаза повышалось до 0.4 МПа компрессором для поддержания необходимого давления в батарее ТОТЭ. Риформинг смеси не проводился, что позволило реализовать когенерационную энергоустановку при КПД (эл.) 50–55% и КПД (т.) около 30%. При этом электрический КПД оценивался с учетом доли метана в исходном биогазе.

Цель настоящей работы – определение технического потенциала использования свалочного газа для производства тепловой и электрической энергии на территории России с учетом имеющихся в ИФТТ РАН наработок по материалам и технологиям ТОТЭ. На модельном свалочном газе, состав которого был сформирован по данным литературного обзора, исследована работа ТОТЭ для оценки выработки электрической энергии с учетом фактической вольт-амперной характери-

стики элементов, а также определены энергетические затраты на очистку и подготовку топливного газа для ТОТЭ. Масштаб лабораторной установки определялся демонстрацией возможностей утилизации свалочного газа и получения из него электрической энергии. На основе экспериментальных результатов и статистических данных выполнена оценка ежегодного образования свалочного газа на полигонах ТКО России (валового потенциала свалочного газа) и энергии, которую возможно получить из этого газа с использованием ЭХГ ТОТЭ (технического потенциала свалочного газа).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования электрохимических характеристик твердооксидных топливных элементов в условиях утилизации модельных сбросных газов были изготовлены биполярные токовые коллекторы [12, 13] и концевые катодные и анодные пластины. Электрический контакт между керамическим катодом и металлическими коллекторами обеспечивался с помощью контактного состава LSM(La_{0.8}Sr_{0.2})_{0.95}MnO_{3-d} [14]. Для разделения газовых пространств и герметизации сборки использовали высокотемпературный стеклокерамический герметик. Все элементы конструкции собирали в генерирующий блок (сборку). Генерирующий блок из двух ТОТЭ был установлен в испытательный стенд (рис. 1).

Модельный состав газовой смеси задавался с помощью датчиков массового расхода Bronkhorst (Нидерланды) в блоке подачи топлива, после чего она увлажнялась в увлажнителе Fideris (Канада) для проведения в дальнейшем паровой конверсии метана. После увлажнения газ подавался в генерирующий блок ТОТЭ, который был термостатирован в печи при заданной температуре под механической нагрузкой 0.2 кг/см². В генерирующем блоке происходила конверсия метана. После этого продукты конверсии проходили через осушитель и подавались в газоанализатор производства ООО “Бонэр” (Россия) на основе датчиков Siemens (Германия) для контроля состава газа, а затем в измеритель потока.

Измерения исследуемых показателей выполняли с помощью потенциостата/гальваностата Reference 3000™ (Gamry) с подключенным к нему внешним усилителем тока Reference30K Booster™. Прибор позволяет измерять максимальное напряжение ±32 В при максимальном токе ±30 А и выполнять EIS-измерения частотой до 300 кГц.

В соответствии с подобранной программой спекания для герметизации и активации генерирующего блока перед электрохимическими измерениями были осуществлены следующие дей-

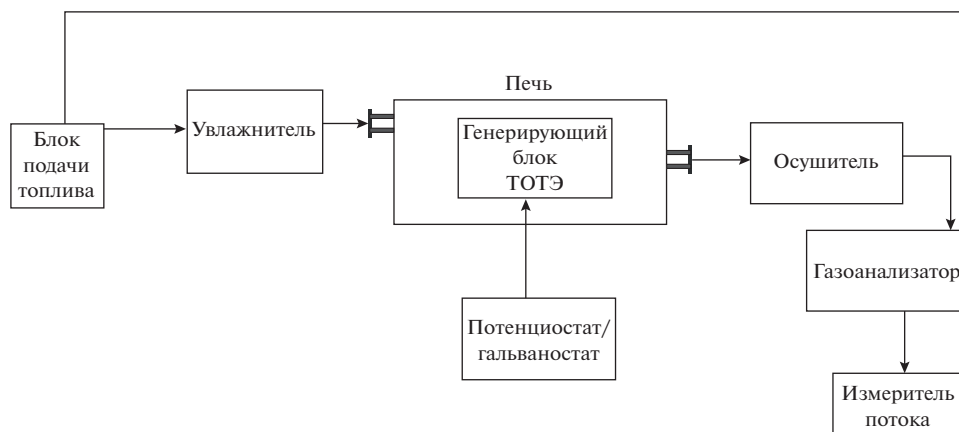


Рис. 1. Схема установки для проведения эксперимента

ствия под нагрузкой 5 А при неизменных газовых потоках:

нагрев блока до температуры 500°C со скоростью 1°C/мин в воздушной атмосфере;

выдержка при температуре 500°C в течение 3 ч;

нагрев до температуры 940°C со скоростью 2°C/мин в атмосфере азота со стороны анода, в атмосфере воздуха – со стороны катода;

выдержка при температуре 940°C в течение 3 ч, после выдержки в течение 1 ч атмосферу в анодной камере меняли на смесь азот/водород (соотношение содержания компонентов 90/10);

охлаждение до рабочей температуры 850°C со скоростью 1°C/мин.

Экспериментальные исследования на генерирующем блоке ТОТЭ проводили при следующих рабочих условиях:

рабочая температура, заданная контроллером высокотемпературной печи, 850°C;

состав топливной смеси (в расчете на сухой газ), % (по объему): CH_4 – 47.4, CO_2 – 52.6;

расход компонентов топливной смеси, $\text{см}^3/\text{мин}$: CH_4 – 86, CO_2 – 95.5;

состав и расход окислительной смеси – воздух, 2.5 $\text{дм}^3/\text{мин}$;

относительная влажность топливной смеси – от 12 (при выходе на режим) до 20% (во время испытаний).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2, а представлены вольт-амперная и мощностная характеристики генерирующего блока ТОТЭ в виде зависимости напряжения U и удельной мощности P от тока I . В качестве окислителя использовали воздух при скорости потока 2.5 $\text{дм}^3/\text{мин}$, в качестве топлива – водород при скорости потока 0.6 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Относительная

влажность газов составляла 12%, мощность – 35.75 Вт при напряжении на сборке 1.4 В, удельная мощность – 0.22 $\text{Вт}/\text{см}^2$. Пиковой мощности достичь не удалось вследствие предельного тока 30 А, мощность при этом токе составила 40 Вт.

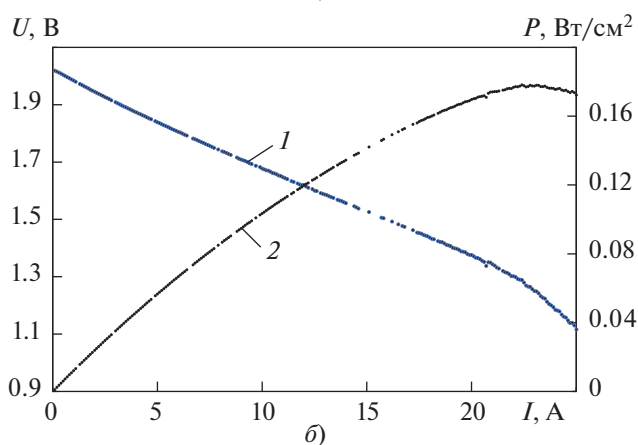
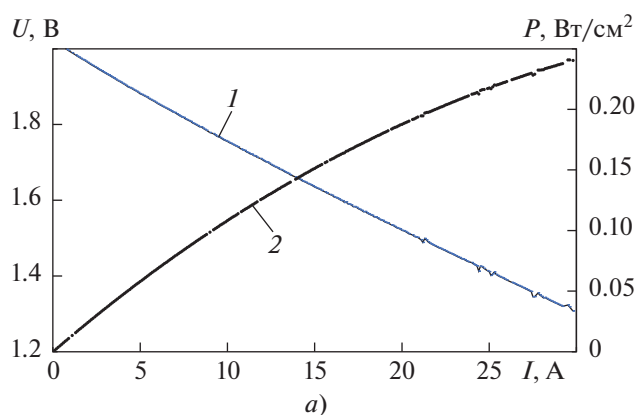


Рис. 2. Вольт-амперная и мощностная характеристики сборки из двух ТОТЭ при использовании в качестве топлива чистого водорода (а) и свалочного газа (б). 1 – U ; 2 – P

С учетом предполагаемой паровой конверсии содержащегося в свалочном газе метана в мембранно-электронном блоке (МЭБ) при температуре 850°C был определен состав топливной смеси, % (по объему):

H ₂	59.5
H ₂ O.....	22.3
CO.....	13.0
CO ₂	5.1
CH ₄	0.1

Данный состав близок к термодинамически равновесному, который характерен для никелевых катализаторов, % (по объему):

H ₂	59.5
H ₂ O.....	22.5
CO.....	13.0
CO ₂	5.0
CH ₄	0

При этом удельный объемный расход топлива для ТОТЭ (H₂ + CO) составляет 172 см³/мин на один МЭБ, для получения которого требуется расход свалочного газа в расчете на сухой газ 90.8 см³/мин, т.е. 86.0 см³/мин CH₄ [47.4% (по объему)] + 95.5 см³/мин CO₂ [52.6% (по объему)]. В качестве окислителя использовали воздух (2.5 дм³/мин). Относительная влажность была увеличена до 20%.

На рис. 2, б представлены вольт-амперная и мощностная характеристики генерирующего блока ТОТЭ при использовании в качестве топлива модельного свалочного газа. Видно, что мощность при напряжении на сборке 1.4 В составляла приблизительно 27.0 Вт, удельная мощность – 0.17 Вт/см². При токе 23.1 А эти показатели равнялись 28.8 Вт и 0.18 Вт/см² соответственно. Содержание компонентов газа измеряли с помощью системы газового анализа. В отходящих газах содержание метана не превышало 0.01% (по объему), что свидетельствует о высокой степени его утилизации. Таким образом, можно сделать вывод, что устройство мощностью 1 кВт потребляет около 6.3 дм³/мин топлива в пересчете на сухой газ.

Для проверки возможности исследования электрохимических характеристик проводили съемку годографов импедансных спектров каждого из МЭБ, составляющих генерирующий блок ТОТЭ, в условиях разомкнутой цепи при различных составах топливных смесей. На рис. 3 представлены годографы импеданса одного из мембранно-электродных блоков ТОТЭ, входящих в генерирующий блок при использовании в каче-

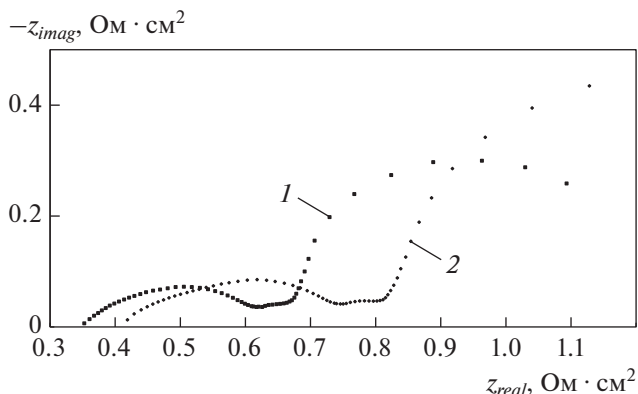


Рис. 3. Импедансный спектр одного МЭБ при использовании в качестве топлива чистого водорода (1) и свалочного газа (2)

стве топлива водорода и свалочного газа. Полученные данные показывают, что основной вклад в полное внутреннее сопротивление исследуемого элемента вносят процессы, протекающие на электродах ТОТЭ. Омическое сопротивление практически не изменяется при смене применяемого топлива.

Несмотря на то что результаты экспериментов позволяют перейти к количественным оценкам технического потенциала использования свалочного газа в ТОТЭ, требуется провести дополнительные исследования ресурсных характеристик, что будет сделано в последующих работах.

ОЦЕНКА ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА СВАЛОЧНОГО ГАЗА В РОССИИ

Для проведения оценок потенциального ежегодного выхода свалочного газа из полигонов ТКО России (валового потенциала) были приняты некоторые допущения. Основой количественных оценок валового потенциала свалочного газа и метана в его составе являлась методика определения эмиссии метана от полигонов ТКО, изложенная в [15] и апробированная в [16]. Предполагалось, что ежегодно образующийся объем свалочного газа пропорционален количеству захороненных ежегодно ТКО (т.е. годовой объем отходов переходит в стадию активного метаногенеза). Тогда выражение для ежегодной эмиссии метана, тыс. т/год, от полигона ТКО можно представить в виде

$$E_{CH_4} = \left(MSW \times MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} - R \right) \times (1 - OX), \quad (1)$$

где MSW – общее количество отходов, захороненных на полигоне за год; MCF – коэффициент



Рис. 4. Морфологический состав твердых коммунальных отходов в Московской обл., % [17]

коррекции потока метана, отражающий глубину залегания отходов (типичное значение 0.6); DOC – доля потенциально разлагающегося органического вещества (определяется по составу отходов); DOC_f – доля органического вещества, которое фактически разлагается (типичное значение 0.77); F – доля метана в образующемся на свалках газе (типичное значение 0.5); $16/12$ – коэффициент пересчета содержания C в содержание CH_4 ; R – расход утилизированного метана (в расчетах авторов принимается равным 0); OX – коэффициент окисления (обычно 0).

При оценке DOC использовали морфологический состав ТКО в Московской обл. (рис. 4). Состав отходов разлагающегося органического вещества определяли по содержанию углерода в бумаге и тканевых материалах (40%), пищевых отходах (15%), непищевых отходах парков и садов (17%), древесных отходах и соломе (30%). Ключевой характеристикой для оценок выхода свалочного газа и метана в его составе является годовое образование твердых коммунальных отходов. Нормы образования отходов варьируются в различных регионах России и зависят от сезона, однако для генерализованных оценок были приняты следующие средние нормы при влажности 50% [18]:

для городских жителей – 1.2 кг/(чел · сут);

для сельских жителей – 0.52 кг/(чел · сут) (предполагается, что в сельской местности пищевые отходы используются в качестве корма домашних животных и птицы и не входят в состав отходов).

Свалки в сельской местности гораздо менее масштабны и рассредоточены. На практике си-

стемы дегазации этих свалок применяются редко. Поэтому расчеты выхода метана, как калорийного компонента свалочного газа, проводили лишь с учетом городского населения России по состоянию на 01.01.2021 [19]. Общее количество свалочного газа, образующегося ежегодно в России, составило $8800 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$, в том числе метана $4200 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ (2722 тыс. т/год).

По той же методике были оценены объемы свалочного газа и метана в его составе для крупных городов России с населением не менее 100 000 человек (всего 117 городов) [19]. Общее количество свалочного газа, образующегося ежегодно в крупных городах России, составило $5490 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$, в том числе метана $2600 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ (1685 тыс. т/год). В зависимости от распределения городского населения в пределах субъекта в административных центрах образуется от 30 до 100% объемов ТКО и, соответственно, свалочного газа и метана. Полученные результаты оценок представлены на рис. 5, где приведено распределение объемов образующегося метана без детализации распределения его по территории субъектов.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОТЭ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СВАЛОЧНОГО ГАЗА

Для оценки потенциального производства электроэнергии из свалочного газа были приняты следующие допущения:

на полигоне ТКО монтируется когенерационная энергоустановка, включающая в себя двухступенчатую систему очистки свалочного газа (на основе водяного охлаждения и сорбции примесей на активированном угле) и электрохимический генератор на основе ТОТЭ;

как тепловая, так и электрическая энергия в полном объеме принимаются в сети ближайшего населенного пункта;

выход тепловой энергии [0.47 кВт · ч/(кВт · ч) (эл.)] и потребление ее на собственные нужды $\phi = 7.7\%$ выработки на энергоснабжение блоков водяного охлаждения, дожимного компрессора, нагнетателя соответствуют результатам проекта DEMOSOFC [11];

удельное потребление свалочного газа q на продуцирование 1 кВт · ч (эл.) согласно экспериментальным данным, полученным в ИФТТ РАН, составляет $0.4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Выражение для выхода электроэнергии W_e для конкретных полигонов и регионов можно записать в виде

$$W_e = qE \frac{1}{\omega} \left(1 - \frac{\phi}{100} \right), \quad (2)$$

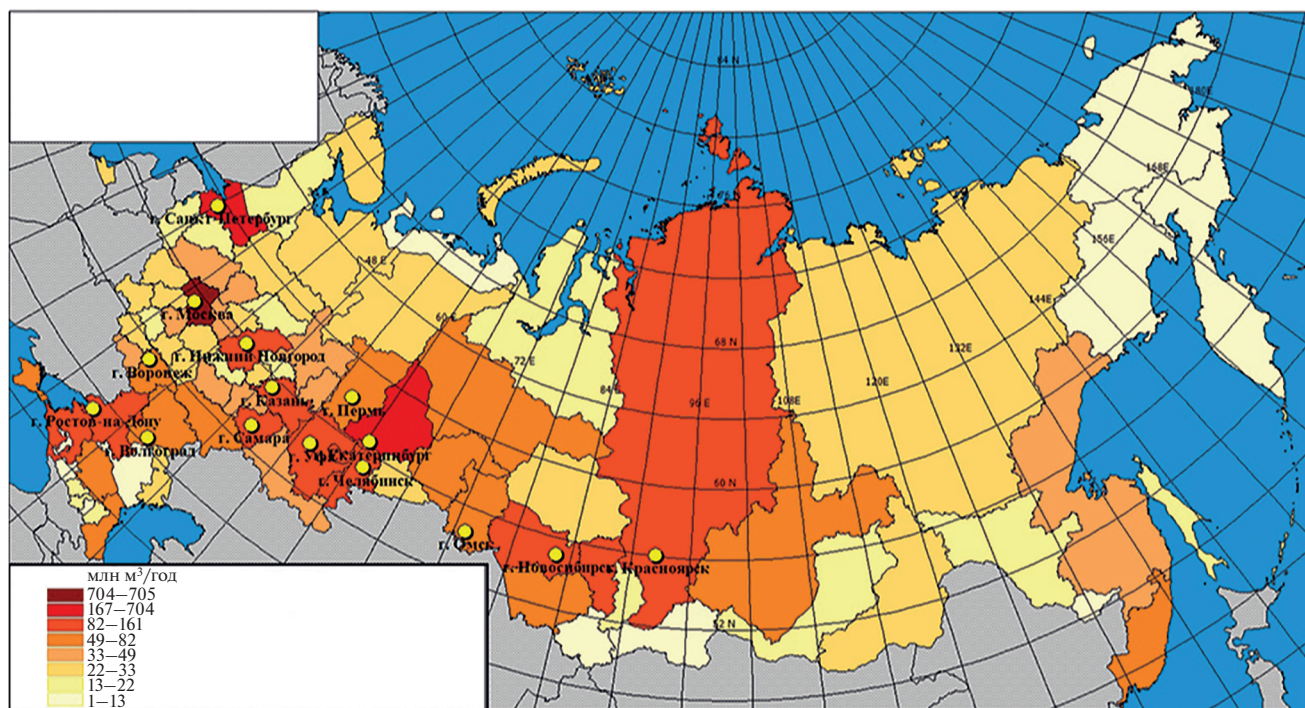


Рис. 5. Распределение валового потенциала метана в составе свалочного газа по субъектам России

где ω — доля метана в составе свалочного газа; E — выход свалочного газа.

Несмотря на то что в ходе оценки валового потенциала полигонов ТКО был рассчитан выход и метана, и свалочного газа, в оценках технического потенциала учитывали именно выход свалочного газа, поскольку значение q определено для смеси газов с учетом возможных диффузионных ограничений со стороны углекислого газа. Выражение для тепловой энергии W_h с учетом данных проекта DEMOSOFC можно представить в виде [11]

$$W_h = 0.47W_e. \tag{3}$$

Результаты вычислений по формулам (2), (3) показывают, что доступная электрическая энергия при использовании ТОТЭ может составлять 3278 млн кВт · ч/год, тепловая — 1512 млн кВт · ч/год для всех полигонов ТКО в России. Из них 2045 и 930 млн кВт · ч/год приходятся на крупные города. Как и следовало ожидать, технический потенциал сосредоточен в крупных городских агломерациях, что упрощает задачу использования получаемой электрической и тепловой энергии.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена работоспособность батареи ТОТЭ на модельном свалочном газе без использования внешнего блока паровой конверсии метана, что в дальнейшем поз-

волит эффективно работать с природным газом и другими метансодержащими смесями.

2. Технический потенциал выхода свалочного газа и метана в его составе для территории России составляет 3278 млн кВт · ч/год электрической энергии и 1512 млн кВт · ч/год тепловой энергии.

3. Электрическая мощность единичных установок равна 1.0–1.5 МВт, что открывает широкие возможности для развития отечественного рынка ТОТЭ в рамках программ по энергоэффективности и рекультивации полигонов ТКО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fuel cell power for a sustainable planet.** Ballard Power Systems Inc. Management’s Discussion and Analysis. Third Quarter 2020. /https://www.ballard.com/docs/default-source/financial-reports/2020/2020-mda-q3-final.pdf?sfvrsn=f8ddd80_6
2. **On the technical challenges** affecting the performance of direct internal reforming biogas solid oxide fuel cells / M.A. Abdelkareem, W.H. Tanveer, E.T. Sayed, M. El H. Assad, A. Allagui, S.W. Cha // Renewable Sustainable Energy Rev. 2019. No. 101. P. 361–375.
3. **Papurello D., Lanzini A.** SOFC single cells fed by biogas: Experimental tests with trace contaminants // Waste Manage. 2018. No. 72. P. 306–312.
4. **Weidner E., Cebolla Ortiz, Davies J.** Global deployment of large capacity stationary fuel cells – Drivers of, and barriers to, stationary fuel cell deployment. EUR

- 29693 EN, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
5. Staniforth J., Kendall K. Cannock landfill gas powering a small tubular solid oxide fuel cell – a case study // *J. Power Sources*. 2000. No. 86. P. 401–403.
 6. Zappini G., Cocca P., Rossi D. Performance analysis of energy recovery in an Italian municipal solid waste landfill // *Energy*. 2010. No. 35. P. 5063–5069.
 7. Din Z.U., Zainal Z.A. Biomass integrated gasification – SOFC systems: Technology overview // *Renewable Sustainable Energy Rev*. 2016. No. 53. P. 1356–1376.
 8. Requirements, techniques, and costs for contaminant removal from landfill gas / J.N. Kuhn, A.C. Elwell, N.H. Elsayed, B. Joseph // *Waste Manage*. 2017. No. 63. P. 246–256.
 9. Shiratori Y., Oshima T., Sasaki K. Feasibility of direct-biogas SOFC // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2008. No. 33. P. 6316–6321.
 10. Papadias D.D., Ahmed S., Kumar R. Fuel quality issues with biogas energy – an economic analysis for a stationary fuel cell system // *Energy*. 2012. No. 44. P. 257–277.
 11. Results from an industrial size biogas-fed SOFC plant (the DEMOSOFC project) / M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, M. Acri, T. Nakala, M. Rautanen // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. No. 45. P. 5449–5464.
 12. Пат. на полезную модель № 157575. Батарея ТОТЭ планарной геометрии / С.И. Бредихин, Д.А. Агарков, И.Н. Бурмистров, Н.В. Деменева, Д.В. Матвеев, Ю.С. Федотов, В.В. Хартон. Дата приоритета 05.05.2015. Зарегистрирован 13.11.2015.
 13. Пат. на полезную модель № 179208. Батарея ТОТЭ планарной геометрии с керамическими вкладышами / С.И. Бредихин, Д.В. Матвеев, Ю.С. Федотов, А.Э. Голодницкий. Дата приоритета 21.11.2017.
 14. Processing of manganite-based contact layers for stacking of planar solid oxide fuel cells / E.A. Agarkova, D.V. Matveev, Yu.S. Fedotov, A.I. Ivanov, D.A. Agarkov, S.I. Bredikhin // *Mater. Letters*. 2022. No. 309. P. 131462.
 15. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. М.: Логус, 2004.
 16. Использование свалочного газа в газотурбинных и газопоршневых установках: энергетические и экономические оценки / А.А. Федотов, Д.А. Каранова, А.Б. Тарасенко, С.В. Киселева // *Альтернативная энергетика и экология*. 2019. № 19–21. С. 12–23.
 17. Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами Московской области. Приложение к постановлению Правительства Московской области от 22.12.2017 № 984/47. Красногорск, 2018. С. 14–17.
 18. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / П.П. Безруких, В.В. Дегтярев, В.В. Елистратов, Е.С. Панцхава, Э.С. Петров, В.Н. Пузаков, Г.И. Сидоренко, Б.В. Тарнижевский, А.А. Шпак, А.А. Ямпольский. М.: ИАЦ “Энергия”, 2007.
 19. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2021 г. / <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>

Solid Oxide Fuel Cells' Prospects for Landfill Gas Utilization in Russia

D. A. Agarkov^a, S. I. Bredikhin^a, S. V. Kiseleva^{b,c,*}, D. V. Matveev^a, A. V. Samoylov^a, A. B. Tarasenko^c, Yu. S. Fedotov^a, and E. V. Tsypis^a

^a Osipyan Institute for Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia

^b Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^c Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Abstract—The problem of municipal solid wastes' (MSW) utilization is one of the most actual all over the world nowadays. In Russia, landfills are still the main way for MSW utilization. However, waste decomposition, leading to landfill gas generation, causes, on the one hand, a lot of complaints from local people mainly due to hydrogen sulphide emissions. On the other hand, landfill gas, containing 40–60 vol % of methane, can be considered as calorific fuel. Solid oxide fuel cells (SOFCs), due to high operation temperatures, can be considered as an efficient device for landfill gas conversion to electricity and heat. Withal some companies and laboratories are developing SOFCs with direct methane oxidation to increase conversion efficiency on account of steam reformer expulsion. In this research, issues of landfill gas' useful utilization are considered. Experiments on different materials' application for model gas mixtures' direct conversion into energy by means of an SOFC and foreign experience in the field of landfill gas purification and estimation of its volumes in Russia are taken as initial data. The estimation results obtained allow the authors to consider SOFC application for landfill gas conversion as a significant market niche for Russian hydrogen technologies. Energy efficiency and environmental issues can also be improved by SOFC application in this niche.

Keywords: fuel-cell based generators, solid oxide fuel cells, laboratory scale technology, municipal solid wastes, landfill gas, technical potential