

УДК 533.9.07, 66.08
EDN: YQVKTS

PACS: 52.77.-j, 82.30.Lp

Электрические разряды в водородсодержащих газах и жидкостях (обзор)

© Ю. А. Лебедев

*Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, 119991 Россия**E-mail: lebedev@ips.ac.ru**Статья поступила в редакцию 12.12.2025; после доработки 23.01.2026; принята к публикации 20.02.2026*

Обзор содержит информацию о разнообразных реализованных способах создания низкотемпературной плазмы, используемой для конверсии углеводородов и спиртов в полезные продукты (водород, ацетилен). Даны примеры устройств для генерации плазмы на основе дуговых, барьерных, электронно-пучковых, и СВЧ-разрядов как в газовой среде, так и в жидкостях.

Ключевые слова: электрический разряд, генераторы плазмы, плазмохимия, получение водорода.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-20-40

1. Введение

Исследование процесса разложения водородсодержащих молекул (углеводороды и спирты) в электрических разрядах имеет более, чем столетнюю историю. Так, в книге А. Б. Шехтер [1] упоминаются работы С. R. Berthelot (1876), в которых описано получение ацетилена в искровом разряде в светильном газе и получение ацетилена в дуговом разряде в углеродсодержащих газах. С начала прошлого века область исследования расширяется на другие типы электрических разрядов (например, на тлеющий разряд пониженного давления), но цель изучения остается той же – получение ацетилена. Изучалось влияние геометрии разрядной камеры, скорости протока газа, электрических характеристик разрядов, состава исходного газа на выход ацетилена. Характеристиками процесса были энергозатраты на образование ацетилена и выход ацетилена. Исследовались также процессы в смесях метана с CO_2 и водяным паром. Здесь важно отметить, что в этих случаях не обнаруживалось образование сажи. Конверсия метана в этих случаях идет при темпе-

ратуре 1000–1200 °С практически без образования ацетилена.

Таким образом, уже в начале прошлого века было получено много феноменологической информации о процессах в разрядах водородсодержащих газов. Нужно отметить, что задача получения ацетилена оставалась важнейшей при переработке метана до появления задач, связанной с водородной энергетикой.

В настоящее время в задачах переработки углеводородных газов используются различные типы электрических разрядов. Они описаны в большом количестве книг и обзорных статей [2–15]. Многие исследователи отмечают, что, несмотря на большую на сегодняшний день эффективность действующих технологий, плазменные технологии имеют значительное преимущество благодаря их простоте, компактности, малым временам переходных процессов и невысокой цене.

Для создания термической (квазиравновесной) плазмы используются дуговые разряды при атмосферном давлении и токах разряда 30 А – 30 кА, напряжениях на разряде 10–100 В, что позволяет достигать газовой температуры в разряде до нескольких тысяч граду-

сов. В качестве источников неравновесной плазмы используется скользящая дуга [16, 17], высокочастотные и микроволновые разряды, барьерные и коронные разряды, разряды, создаваемые электронными пучками [18].

Использование неравновесной плазмы в плазмохимических процессах привело к пониманию того, что плазма обладает каталитическими свойствами и может приводить к ускорению плазмохимических процессов [19, 20]. В частности, показано эффективное использование энергии при плазменном катализе приводит к существенному уменьшению энергозатрат на получение водорода из метана. При этом дополнительная энергия, вводимая от плазмы в предварительно нагретый газ значительно меньше энергии, затрачиваемой на нагрев газа. В [20] детально проанализированы процессы, приводящие к плазменному катализу и отмечена роль ионно-молекулярных реакций в механизме плазменного катализа.

Этот подход позволил разработать ряд эффективных плазменных устройств для риформинга различных углеводородов (включая существующие углеводородные топлива) для разных применений [21–25]. В частности, такие устройства позволяют исключить возникшие проблемы, связанные с хранением водорода или синтез-газа. Целесообразно производить эти вещества на месте их потребления. Для этого необходимо разрабатывать бортовые и мобильные конвертеры углеводородного сырья, которые должны удовлетворять ограничениям по габаритам и инерционности.

Для создания плазмы в таких условиях использовались СВЧ-разряды разных типов: импульсные и непрерывные, на частотах 2,45 ГГц и 915 МГц в широком диапазоне мощностей. Разработанные риформеры имели производительность по водороду и синтез-газу в широком диапазоне для обеспечения как бортовых двигателей, так и мобильных установок. Создан прототип бортового автомобильного плазмохимического конвертера производительностью 20 м^3 синтез-газа в час при мощности микроволнового разряда 3 кВт (частота микроволнового излучения 2,45 ГГц). В качестве стационарного источника синтез-газа подобное устройство может производить до 100 м^3 синтез-газа в час при увеличении

мощности источника микроволнового излучения (2,45 ГГц) до 15 кВт. При переходе к микроволновому излучению на частоте 915 МГц и использовании разработанных мощных микроволновых плазмотронов (до 400 кВт) производительность по синтез-газу может быть увеличена до 2500 м^3 час.

Следует заметить, что широко распространенный в зарубежной литературе термин «плазменный катализ» имеет другую интерпретацию, а именно – это комбинация неравновесной плазмы и гетерогенного катализа [см., например, 26–29]. Сочетание неравновесной плазмы с подходящими катализаторами имеет большой потенциал для снижения энергии активации реакций, повышения конверсии реагентов и улучшения селективности по отношению к желаемым продуктам. Все это вносит свой вклад в повышение энергоэффективности плазменного процесса, а также эффективности катализатора, его стабильности за счет уменьшения отравления, коксования и спекания благодаря возникающему синергическому эффекту взаимодействия между плазмой и катализатором (увеличение плотности активных центров, многократная активация катализатора, появление новых путей реакций). При этом нужно понимать, что система является взаимосвязанной, т. е. катализатор влияет на свойства плазмы (изменение электрических полей, микроразряды в порах, изменение типа разряда, изменение плотности плазмы, поглощение частиц плазмы катализатором), а она, в свою очередь, на свойства катализатора (образование горячих точек, понижение активационных барьеров, изменение путей поверхностных реакций, изменение физико-химических характеристик катализатора).

Все это указывает на то, что традиционные представления о катализе, как и сами катализаторы могут быть не эффективны в условиях неравновесной плазмы.

Поэтому требуется провести выбор и разработку катализаторов нового поколения для плазменных сред. В настоящее время в плазменном катализе в качестве материалов используются катализаторы, аналогичные тем, которые используются в термическом катализе. Необходимо исследовать различные классы материалов, чтобы полностью использовать

синергизм плазменных катализаторов. Кроме того, было бы важно выбрать недорогие катализаторы с высокой пригодностью для вторичной переработки.

Необходимо изучить химический состав плазмы на границе раздела катализатора. Несмотря на уже наблюдаемый синергизм между плазмой и некоторыми используемыми материалами, знание химии поверхности плазмы очень ограничено. Без этого невозможно раскрыть потенциал плазменного катализа. Задача является сложной с точки зрения диагностики плазмы, поскольку требуется проведение локальных измерений концентраций частиц у поверхности катализатора.

До последнего времени основными объектами исследований были углеводороды. Сейчас считается, что спирты являются перспективным сырьем для получения водорода в плазме электрических разрядов. Это обусловлено преимуществами их перед другими источниками водорода – такими, как углеводороды: безопасность и простота транспортировки и хранения, широкий спектр исходных материалов для производства этанола, высокое содержание водорода по сравнению с другими топливами, и т. д. В обзоре [30] рассмотрены физико-химические основы и механизмы плазменного риформинга этанола для получения водорода в условиях нетермической дуги, в плазменно-каталитических системах, в ма-

логабаритных плазменных устройствах и т. д. Нужно отметить, что технические средства получения плазмы в углеводородах и спиртах практически не различаются и одни и те же устройства могут применяться в обоих случаях.

В следующем разделе будут рассмотрены некоторые плазменные устройства, используемые для риформинга водородсодержащих газов и жидкостей в плазме. Этот обзор не может претендовать на полноту, поскольку число публикаций исчисляется тысячами и новые публикации появляются все время. Основная цель обзора проиллюстрировать разнообразные пути, которые реализованы исследователями для решения задач плазменного риформинга водородсодержащих газов и жидкостей.

2. Электрические разряды в газах

2.1. СВЧ-разряды

Для переработки углеводородных газов часто применяются СВЧ-плазмотроны. Для этих целей разработано целое семейство газоразрядных устройств, работающих при атмосферном давлении. Так, ряд плазмотронов описан в [21–29, 31–36]. Один из примеров СВЧ-устройств, который используется для получения водорода, показан на рис. 1.

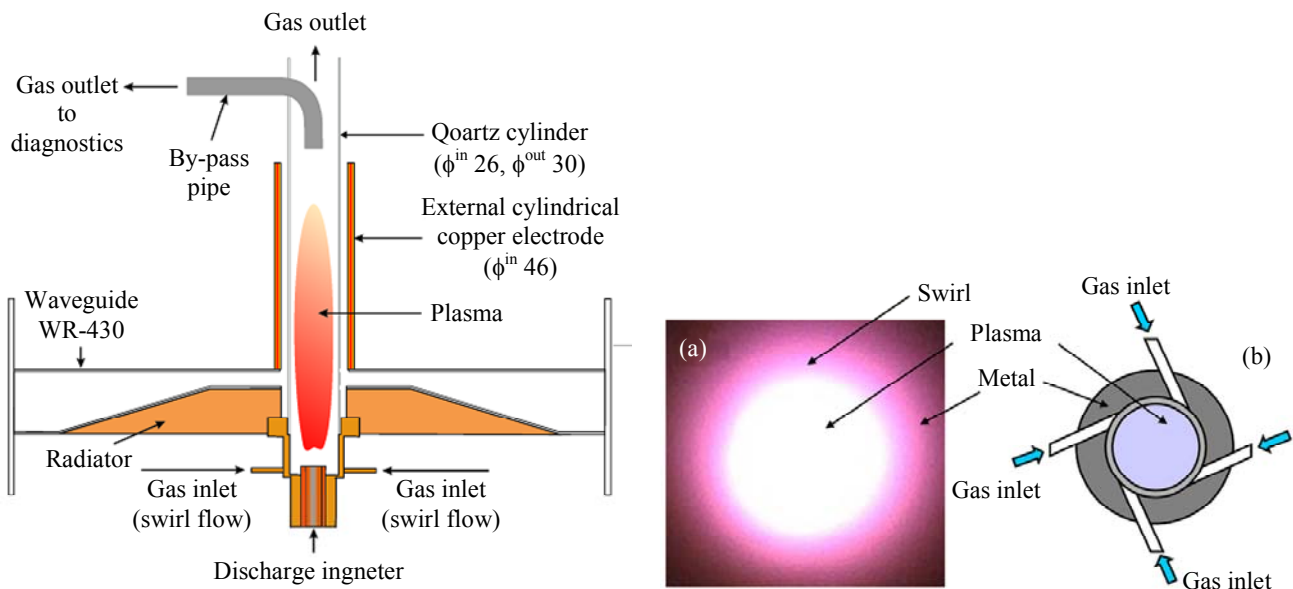


Рис. 1. Схема волноводного плазмотрона для получения плазмы в цилиндрической разрядной трубке при атмосферном давлении [33, 35]

Fig. 1. Schematic diagram of a waveguide plasma torch for producing plasma in a cylindrical discharge tube at atmospheric pressure [33, 35]

Плазмотрон (рис. 1) использовался в [31] для получения водорода риформингом природного газа. Микроволновая мощность изменялась от 3000 до 5000 Вт. Разряд стабилизировался вихревой подачей азота с расходом 50 и 100 л/мин, расход метана до 175 л/мин. Достигнута производительность по водороду 255 г/ч при энергетической эффективности получения водорода 84 г/кВт·ч. Сравнение некоторых экспериментальных результатов по получению водорода показано в таблице 1.

В [41] исследованы возможности получения водорода из синтетического биогаза в

микроволновом реакторе при атмосферном давлении. Синтетический биогаз содержал основные компоненты биогаза, причем отношение концентраций CH_4/CO_2 в экспериментах изменялось от 0 до 1. Плазма создавалась с помощью СВЧ-генератора (915 МГц, 20 кВт) в кварцевой трубке в волноводном реакторе, сходном с приведенной на рис. 1. Рабочий газ подавался через 4 входа, создавая вихревой поток в трубке (расход 3–12 м³/ч). В плазме поглощалось от 4,5 до 7,5 кВт (до 75 % от падающей микроволновой мощности).

Таблица 1

Сравнение некоторых результатов по получению водорода

Метод получения водорода	Состав исходного газа	Энергетическая эффективность [г(Н ₂)/кВтч]
	Обычные методы	
Паровой риформинг метана [37]	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$	20
Электролиз воды [38]		21
	Плазменные методы	
Волноводный плазмотрон без катализатора [31]	$\text{CH}_4 + \text{N}_2$	74
Волноводный плазмотрон с катализатором [31]	$\text{CH}_4 + \text{N}_2$	84
Барьерный разряд [39]	$\text{CH}_4 + \text{air}$	6,7
Скользкая дуга [40]	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$	40

Показано, что отношение $\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 40/60$ оказалось оптимальным для получения высокой энергетической эффективности плазменного риформинга CH_4 . Максимальная достигнутая скорость образования водорода составила 156 г/ч с энергоэффективностью 21 г/кВт·ч. Максимальная энергоэффективность получения водорода 24 г/кВт·ч была достигнута при поглощенной микроволновой мощности 4,5 кВт (в этих условиях скорость образования водорода была 108 г/ч). Максимальная конверсия метана и максимальная селективность по водороду составляли 86,5 % и 73,3 %, соответственно, при поглощенной СВЧ-мощности 6,5 кВт (при расходе биогаза 3 м³/ч).

Другой СВЧ-плазмотрон атмосферного давления предложен в [42] (рис. 2).

Разрядная камера (рис. 2) имеет встроенную активную систему инициирования разряда, состоящую из четырех разрядников 5, расположенных в цилиндрической части

разрядной камеры и развернутые на 90° по окружности. Каждый из разрядников состоит из корпуса 6, центрального электрода 7, высоковольтного входа 8 и снабжен отдельным трубопроводом 9 для подачи плазменного газа (азота) в разрядный промежуток. Зажигание разряда происходит с помощью импульсного генератора с напряжением до 15 кВ и частотой 100 Гц. Подача углеводорода осуществляется через патрубков 10, СВЧ-мощность (до 5 кВт, 2,45 ГГц) подается от генератора 12 через циркулятор 11. Короткозамыкающий поршень 13 служит для подстройки системы, разряд формируется у сопла 14 в центральном проводнике коаксиальной линии. Заметим, что диаметр внешнего проводника коаксиальной линии 4 является запредельным для частоты 2,45 ГГц. Наиболее важным отличием от плазмотрона, представленного на рис. 2, является то, что в последнем разряд поддерживается в кварцевой трубке, в то время как в

представленном на рис. 1 разряд горит у поверхности центрального проводника коаксиальной линии, которая находится в области высоких температур. Это может существенно ограничивать время непрерывной работы плазматрона.

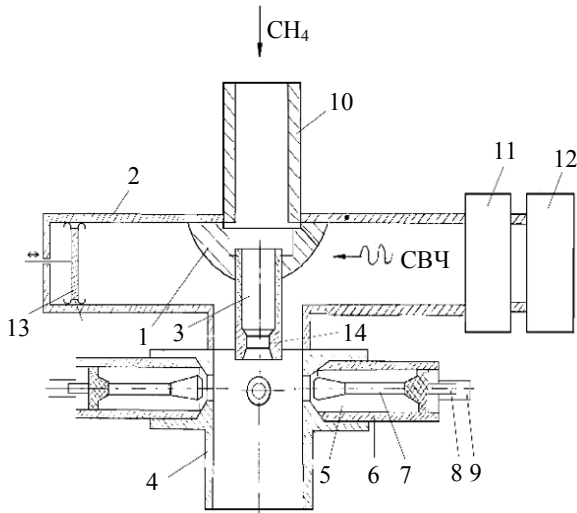


Рис. 2. Схема микроволнового плазматрона с активной системой поджига [42]: 1 – волноводно-коаксиальный переход, 2 – прямоугольный волновод, 3 и 4 – внутренний и внешний проводники коаксиальной линии

Fig. 2. Schematic diagram of a microwave plasma torch with an active ignition system [42]: 1 – waveguide-to-coaxial junction, 2 – rectangular waveguide, 3 and 4 – internal and external conductors of the coaxial line

Кроме этого реактор снабжен проточным реактором с катализатором на основе Fe (металлические частицы с диаметрами 0,5–1,5 мм), что позволяет реализовывать комбинированный плазменно-каталитический процесс. Отмечается, что карбонизация катализатора отсутствует из-за микроразрядов у поверхности частиц катализатора.

Продуктами риформинга природного газа в такой системе являются водород и твердые углеродные частицы. Показано, что в комбинированном процессе (плазма + катализатор) степень конверсии природного газа и концентрация водорода выше, чем без плазмы. Максимальное значение конверсии природного газа 70 % а выход водорода 70 об.% при расходах газа 0,16–0,4 м³/ч.

В модифицированной установке, в которой система поджига помещалась внутри центрального проводника коаксиальной линии, получена конверсия метана до 70 %, выход водорода до 60 об.% с энергетическими затратами порядка 3,3 кВт·ч/м³ водорода при СВЧ-мощности 1–2 кВт и расходе природного газа до 1 м³/ч [43].

2.3. Дуговой разряд, скользящая дуга

В [44] приведены результаты по получению водорода методом парового риформинга метана в скользящем дуговом разряде постоянного тока при атмосферном давлении с последующим каталитическим процессом (катализатор на основе никеля (Ni/CeO₂/Al₂O₃)) в теплоизолированном реакторе без дополнительного источника тепла. Плазма, создаваемая в таком разряде, некоторыми авторами называется «теплой плазмой», имеет температуру электронов порядка 1 эВ, концентрацию электронов 10¹³–10¹⁵ см⁻³, газовую температуру 1000–3000 К и до 45 % поглощенной разрядом энергии может расходоваться на химические реакции. Схема организации процесса показана на рис. 3.

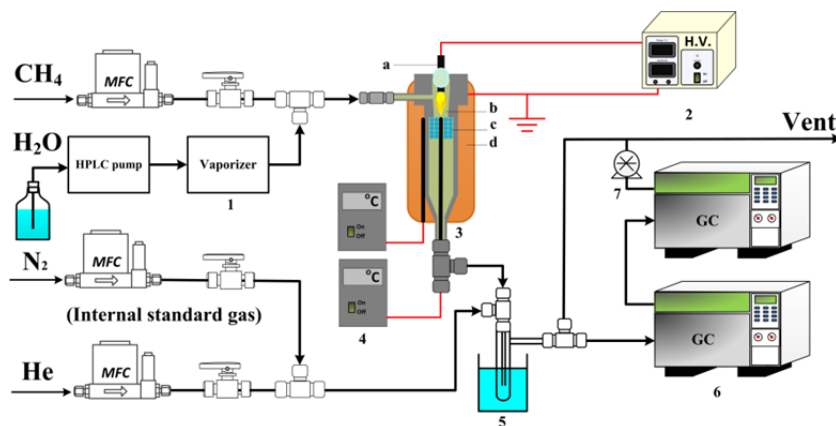


Рис. 3. Схема организации процесса из [44]
Fig. 3. Process organization diagram from [44]

Параметры процесса: ток разряда 50–100 мА, напряжение на разряде 2,5–2,8 кВ, мощность 150–250 Вт, удельный энергозатрат 80–110 кДж/моль, отношение пар/ CH_4 1,5–3,0, полный расход газов на входе 2,2–3,0 л/мин. Газовые продукты содержат CO , H_2 и малые количества CO_2 и C_2H_x (в основном, C_2H_2). При использовании совмещенного с катализом процесса энергозатраты на образование водорода по сравнению с чисто плазменным процессом уменьшаются с 2,3 до 1,5 кВт·ч/м³. В оптимальных условиях установка прорабо-

тала непрерывно 6 часов при конверсии метана порядка 90 % и скорости наработки водорода 2,7 л/мин. Созданная компактная система может быть основой технологии получения водорода с малой производительностью для работы в составе автомобильного комплекса.

В [45] представлены результаты получения водорода при окислительном риформинге в плазме скользящего дугового разряда в н-гептане при атмосферном давлении. Схематическое изображение реактора представлено на рис. 4.

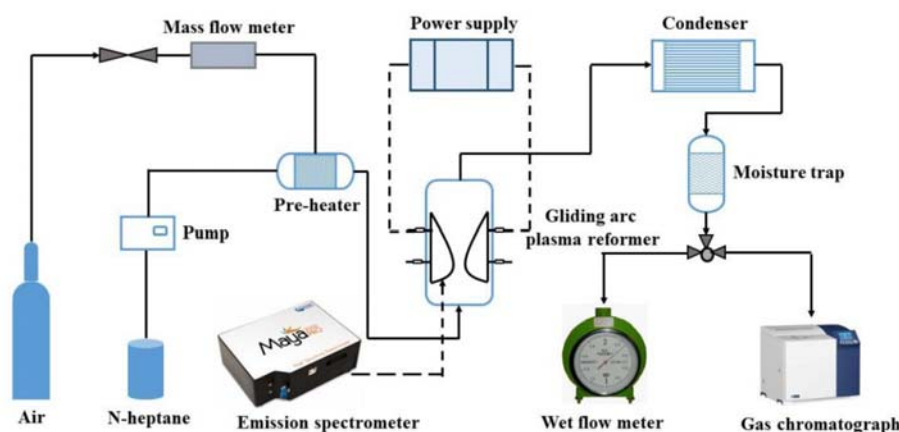


Рис. 4. Схема экспериментальной установки из [45]

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup from [45]

Разряд зажигается между двумя ножевидными электродами с помощью высоковольтного источника (пиковое напряжение 30 кВ, частота 5–20 кГц). Эксперименты проведены при температуре 298 К и мощностях источника 26, 28, 30 и 34 Вт (напряжения 14,7, 15,8, 17,9, 20,4 кВ, соответственно). Предварительно нагретый до 423 К н-гептан смешивался с воздухом и через сопло подавался в реактор. Основными продуктами на выходе реактора были H_2 и CO , в малых количествах наблюдались CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , цис-2-бутен, транс-2-бутен, а-бутан, изобутен. В экспериментах варьировалась мощность разряда, соотношение О/С, время пребывания и расстояние между электродами. Оптимальными параметрами были 30 Вт, 0,71, 24,7 с, и 6,5 мм. Максимальный энергетический выход водорода был 94,5 л/кВт·ч, выход H_2 50,1 %, CO 32,9 %. В статье рассмотрен возможный механизм окислительного риформинга н-гептана в плазме.

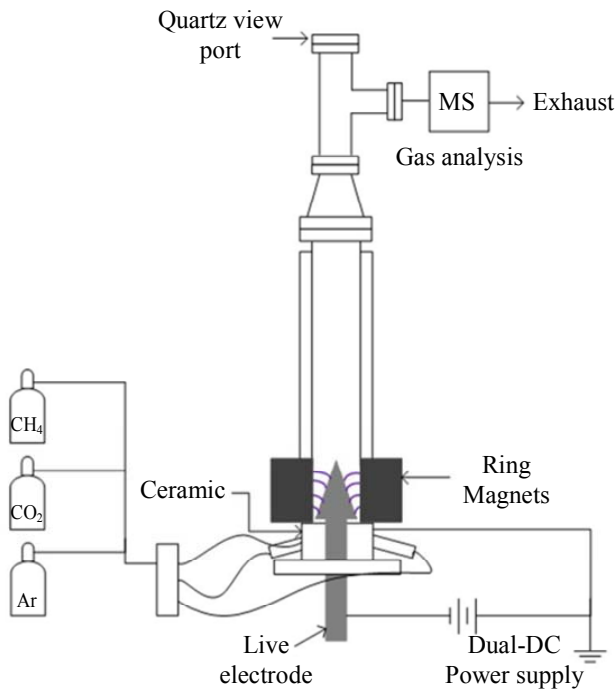
В [46] импульсная вращающаяся скользящая дуга при атмосферном давлении использована для получения синтез газа в про-

цессе углекислотного риформинга природного газа в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$. Разряд зажигается между коническим катодом и полым цилиндрическим анодом (рис. 5). Вращение дуги обеспечивается тангенциальной подачей плазмообразующей газовой смеси, а также внешним магнитным полем. Это позволяет получить больший размер реакционной зоны в плазме и большую однородность распределения активных частиц плазмы по сравнению с обычной скользящей дугой. Содержание Ar в смеси было постоянным и составляло 70 %. Объемное отношение CO_2/CH_4 было 1,0, 1,5, 2,0 при полном расходе 3,7, 4,7, 6,7 нл/мин. Пиковый ток разряда был 0,74 и 1,50 А, с пиковой мощностью 595 и 1186 Вт, соответственно. Параметры варьировались для определения оптимального соотношения для эффективности процесса. Газовый состав продуктов определяли с использованием масс-спектрометра и газового хроматографа.

Для качественного определения активных частиц плазмы использовалась оптическая эмиссионная спектроскопия. В процессе работы на электродах осаждалось углеродсодер-

жащее покрытие, которое анализировалось методом Рамановской спектроскопии. Для исключения влияния этого покрытия на результаты эмиссионной спектроскопии установка

работала в периодическом режиме: 15 минут в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$, затем 5 минут в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ для очистки электродов. Основными газовыми продуктами были H_2 и CO .



Top view
6 tangential gas injectors



Рис. 5. Схема экспериментального устройства и шести инжекторов для газа [46]

Fig. 5. Schematic diagram of the experimental device and six gas injectors [46]

В [47] в ряду других, представлен малогабаритный плазмотрон постоянного тока малой мощности для парциального окисления природного газа, бензина и дизельного топлива в обогащенную водородом смесь при конверсии топлив при атмосферном давлении для использования в бортовых устройствах для двигателей внутреннего сгорания (рис. 6). Нужно отметить, что разработка риформеров малой производительности для использования в мобильных условиях является широко распространенной задачей. Плазмообразующим газом является воздух, воздух и топливо инжектировались в плазменную зону, мощность плазмотрона 50–300 Вт, ток разряда 15–120 мА (вес устройства 3 кг). При использовании плазмотрона в непрерывном режиме увеличение соотношения атомов кислорода и углерода (O/C) увеличивает концентрацию водорода и конверсию метана. Увеличение мощности увеличивает концентрацию водорода. Концентрация водорода в смеси на выходе 10–12 % может быть получена за ~1 с при отношении O/C порядка 2,2 и 300–400 Вт. Поток водорода на выходе 30–50 л/мин.

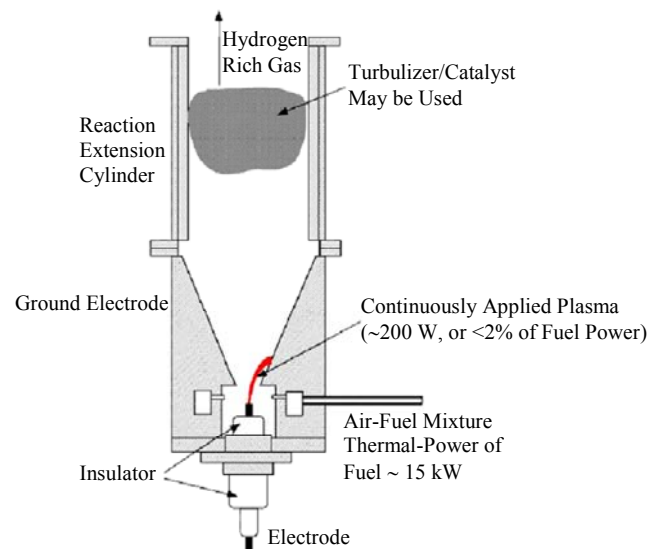


Рис. 6. Риформер топлива с нетермическим плазмотроном малого тока [47]

Fig. 6. Fuel reformer with a low-current non-thermal plasma torch [47]

Компактное устройство для плазменного риформинга было успешно интегрировано с бензиновым двигателем на испытательном стенде. Были проведены эксперименты с двигателем для определения эффекта риформинга

на выбросы и КПД. При определенных условиях получено снижение выбросов NO_x примерно на два порядка величины. Микроформер надежно работал в течение относительно длительного периода (более 6 часов в сутки) при работе на бензине. Отмечено, что требуются дополнительные усилия, чтобы уменьшить электромагнитный шум, а также для лучшей интеграции преобразователя топлива микроплазматрона в двигатель. Быстрый отклик, а также устойчивость к характеристикам топлива и температура окружающей среды, делает микроформер с плазменным наддувом пригодным в качестве преобразователя топлива для множества бортовых приложений (работа выполнена в Центре плазменных исследований и термоядерного синтеза Массачусетского технологического института).

2.3. Барьерный разряд

Одним из разрядов, часто используемых и исследуемых для решения задач плазмохимии является барьерный разряд. Важным его преимуществом является простота технической реализации.

В [48] представлены результаты по получению водорода риформингом метана в барьерном разряде при атмосферном давлении в комбинированном реакторе с барьерным разрядом с катализатором (авторы называют его диэлектрическим разрядом, инициируемым коронным разрядом).

Схема реактора показана на рис. 7. Реактор состоял из двух коаксиальных кварцевых трубок. Внутренняя трубка заполнена металлическим порошком и использовалась в качестве высоковольтного электрода. Внешняя трубка, обернутая медной сеткой, использовалась в качестве заземленного электрода. Разрядный промежуток составлял 10 мм. Объем разряда составлял $100,5 \text{ см}^3$ и 100 мм в длину. Плазма генерировалась высоковольтным генератором переменного тока с пиковым напряжением 30 кВ (частота около 20 кГц). Для улучшения характеристик реактора в зону разряда добавляли смешанный катализатор из никелевого порошка (7 г, средний размер частиц 100 мкм) и 5 масс.% NiO-керамического волокна (11,1 г). В разряд подавались подогретые метан, воздух и пары воды: молярное

отношение O_2/C на входе варьировалось от 0,1 до 1; молярное отношение H_2/O на входе было зафиксировано на уровне 1; скорость потока метана на входе поддерживалась на уровне 0,35 л/мин; входная мощность варьировалась от 20 до 100 Вт; температура предварительного нагрева подаваемого газа составляла 200, 250, 300 или 350 °С. Температура стенки реактора находилась в диапазоне 750–840 К.

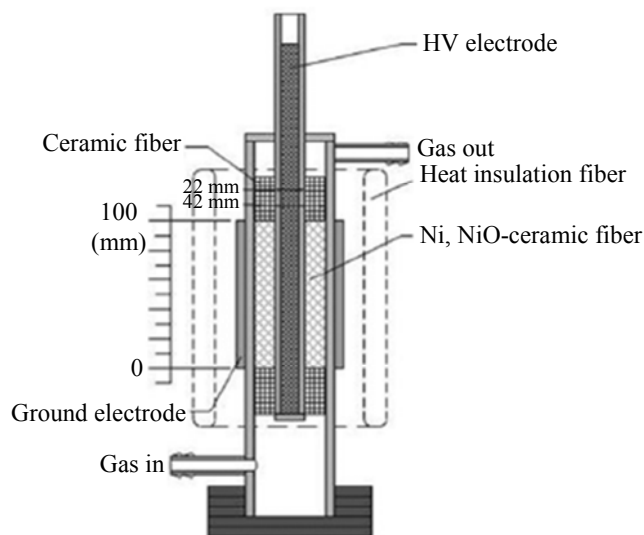


Рис. 7. Схема реактора с барьерным разрядом [48]
Fig. 7. Diagram of a reactor with a barrier discharge [48]

Показано, что добавление катализатора значительно уменьшает напряжение пробоя разряда и разряд становится более стабильным и однородным. Мощность разряда и молярное отношение O_2/C являются ключевыми факторами, влияющими на конверсию

метана, но на селективность по водороду влияет только молярное отношение O_2/C (максимальная степень конверсии метана 75 % достигается при O_2/C 0,5–0,75, подаваемый газ должен быть предварительно нагрет до температуры не выше 200 °С, мощность разряда 50–60 Вт). Хотя механизм разложения метана не ясен, авторы полагают, что разложение метана в их условиях является термодинамически равновесным.

В [49] описано компактное плазменное устройство для получения водорода из CH_4 и C_3H_8 для питания топливного элемента непосредственно на борту. Приведены результаты по исследованию двух систем: барьерный разряд и система с катализатором (рис. 8). Системы рассчитаны на работу при давлениях

вплоть до 2,5 атм. Разряд создавался высоковольтным импульсным генератором (< 8 кВ) с длительностью импульса порядка 10 мкс с частотой повторения 2–4 кГц. Разрядный объем был заполнен углеводородом и разряд поддерживался в течении до 3 часов.

В экспериментах получено, что в смеси после обработки метана в разряде при энергии 138 Втч содержится 60% водорода, что соответствует энергетической эффективности получения водорода 110 кДж/л при давлении 1,5 атм и 130 кДж/л при давлении 2,5 атм. В работе с катализатором показано изменение свойств системы из-за осаждения углерода на электродах и катализаторе. Для дальнейшего использования система должна быть снабжена фильтрами для очистки водорода.

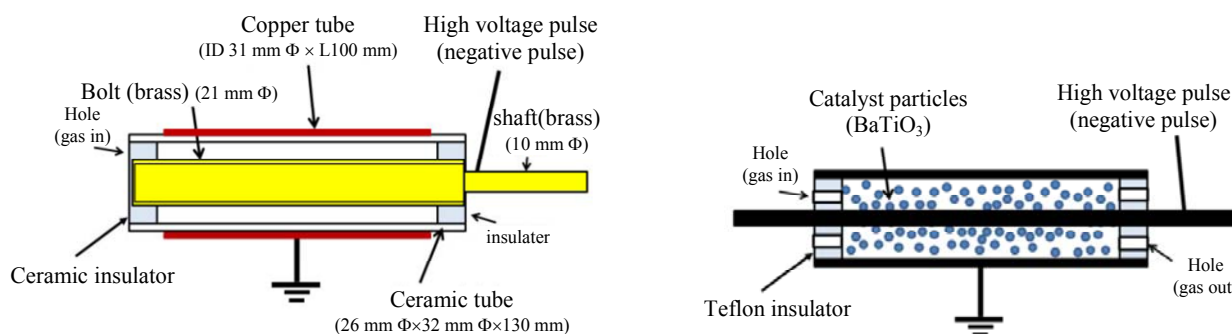


Рис. 8. Разрядная система с барьерным разрядом (слева) и с катализатором (справа) [49]

Fig. 8. Discharge system with a barrier discharge (left) and with a catalyst (right) [49]

Рис. 9. Схема экспериментальной установки: 1 – баллон с углеводородом, 2 – баллон с аргоном, 3 – смеситель, 4 – насос, 5 – плазменный реактор, 6 – кварцевая рубашка реактора, 7 и 8 – входной и выходной патрубков, 9 – заземленный электрод, 10 – термостат, 11 – высоковольтный электрод, 12, 13 – торцевые крышки, 14 – высоковольтный генератор, 15 – цифровой осциллограф, 16 – световод, 17 – делитель напряжения, 18 – емкостной шунт, 19 – газовый хроматограф/масс-спектрограф [51]

Fig. 9. Schematic diagram of the experimental setup: 1 – hydrocarbon cylinder, 2 – argon cylinder, 3 – mixer, 4 – pump, 5 – plasma reactor, 6 – reactor quartz jacket, 7 and 8 – inlet and outlet pipes, 9 – grounded electrode, 10 – thermostat, 11 – high-voltage electrode, 12, 13 – end caps, 14 – high-voltage generator, 15 – digital oscilloscope, 16 – fiber optic cable, 17 – voltage divider, 18 – capacitive shunt, 19 – gas chromatograph/mass spectrograph [51]

Максимальная концентрация водорода в смеси на выходе ($\sim 60\%$) получена при разложении CH_4 , добавление воды слабо влияет на выход водорода. Выход водорода во всех других углеводородах значительно меньше и возрастает при добавлении CH_4 .

В [52] исследовано влияние длины цепи неразветвленных C1-C16 алканов (метан, этан, пропан, н-гексан, н-гептан, н-октан, н-додекан, н-гексадекан, расход жидких и газообразных углеводородов был 0,35 и 25 мл/мин) и газа носителя ($\text{Ar} + (100 \div 25\%) \text{CH}_4$), расход

100 мл/мин) на процесс получения водорода при разложении в неравновесной плазме наносекундного барьерного разряда при атмосферном давлении. Цель – разработка бортовых устройств получения водорода.

Для получения разряда использовался импульсный генератор с напряжением в импульсе до 9 кВ с временами нарастания и падения менее 100 нс, шириной импульса около 50 нс, частотой повторения до 18 кГц. Схема реактора показана на рис. 10.

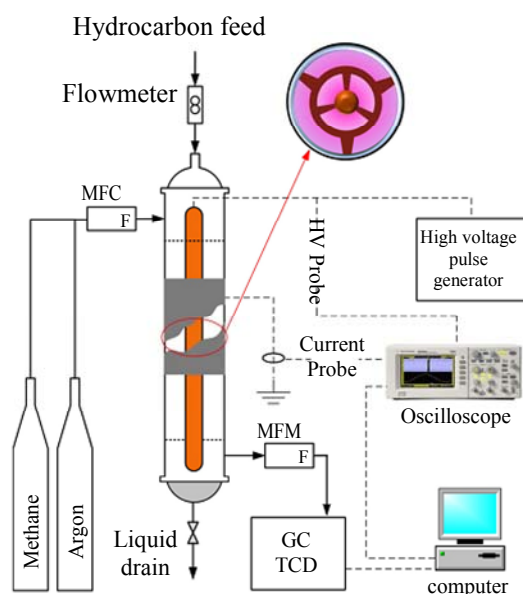


Рис. 10. Схема реактора из [52]
Fig. 10. Reactor diagram from [52]

Кварцевая разрядная трубка ориентирована вертикально, проток газа осуществляется сверху вниз, высоковольтный электрод центрирован по оси разрядной трубки, заземленный электрод изготовлен из латунной фольги на внешней стенке трубки.

Показано, что производительность реактора значительно увеличивается за счет увеличения числа атомов углерода в исходных углеводородах углеводородного сырья. Энергетическая эффективность и скорость производства водорода уменьшаются при увеличении концентрации метана в газе носителе. Энергетическая эффективность и скорость производства водорода варьируются от 23,8 до 121,1 л/кВт ч и от 17,04 до 34,05 мл/мин, соответственно. Наибольшая энергетическая эффективность была достигнута при использовании *n*-гексадекана при мощности разряда 55,5 Вт.

2.4. Электронно-пучковый разряд

Одним из новых направлений в плазменной переработке природного газа является использование электронно-пучкового разряда [53]. В таких разрядах плазма создается электронным пучком и может поддерживаться в широком диапазоне давлений. В [54] описана система, в которой использован электронный пучок с энергией порядка нескольких кэВ, генерируемый электронной пушкой с полым катодом. Метан поступал в разрядную секцию в виде сверхзвуковой струи. Плазма в таких системах неравновесная. Функция распределения электронов по энергиям имеет длинный пологий хвост в диапазоне энергий 10–100 эВ. Энергия вторичных электронов по разным данным лежит в диапазоне 1–20 эВ. При оптимальном соотношении между плотностями газового и электронного потоков достигнута конверсия метана в водород 0,9–0,95 при коэффициенте использования метана до 0,5.

3. Разряды в жидких углеводородах

В последнее время внимание исследователей привлекают электрические разряды, создаваемые в объеме, или над поверхностью жидкостей [55–59]. Это обусловлено широкими возможностями их применения.

Наименее изученными являются СВЧ-разряды в жидкостях [60–63]. В них плазма создается в газовом пузыре внутри жидкости, эффективность физико-химических процессов под действием ее активных частиц и излучения оказывается большой. Соответственно велики и скорости образования продуктов. Имеется цикл работ по исследованию газовых продуктов микроволнового разряда в широком спектре жидких углеводородов: *n*-гептан [63], *n*-додекан [64–69], *n*-гептан, октан, изооктан, декан, пентадекан, гексадекан, циклогексан, бензол, толуол, ортоксилол, нефрас С2 80/120 [70].

В них показано, что основными газовыми продуктами являются водород (до 80 %) и C_2H_2 (порядка 20 %). Остальными значимыми (но более, чем на порядок меньшими концентрациями) продуктами являются CH_4 , C_2H_4 .

В [71] для получения водорода в *n*-доде-

кане использована разрядная система, в которой разряд зажигается на конце антенны (рис. 11). Антенна погружена в жидкий углеводород и газовый пузырь с плазмой находится в жидкости. Реактор помещен в микроволновую печь (рис. 11). Длина антенны равна четверти длины волны микроволнового излучения с учетом диэлектрической постоянной жидкого углеводорода ($\lambda[\text{см}] = 30/(f[\text{ГГц}]\epsilon^{0.5})$), где f – частота поля, ϵ – диэлектрическая постоянная жидкого углеводорода. Для жидких алканов $\epsilon \approx 2,0$ и $\lambda/4 \approx 20$ мм для частоты 2,45 ГГц. Для увеличения эффективности устройства использовались системы с несколькими антеннами (рис. 11). Эксперименты проводились при микроволновой мощности 750 Вт и давлении над поверхностью жидкости равном атмосферному давлению.

Энергозатраты на производство водорода оценивались, как 640 кДж/моль при мощности 750 Вт. Нужно заметить, что это погрешность этой величины оценить трудно, поскольку реальная поглощенная в плазме мощность не известна. Скорость образования водорода 26 мл/с (за 28 с было произведено 1000 мл газа (сумма H_2 , C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4). В разряде, кроме газовых продуктов образуется твердая углеродсодержащая фаза со скоростью 4 мг/с. Использование систем антенн другого типа (разорванные кольца) позволили уменьшить энергозатраты на получение водорода в разряде в жидком н-додекане до 560 кДж/моль [72].

Большинство исследований по микроволновым разрядам в жидкостях были выполнены в разрядной системе, схематически изображенной на рис. 12.

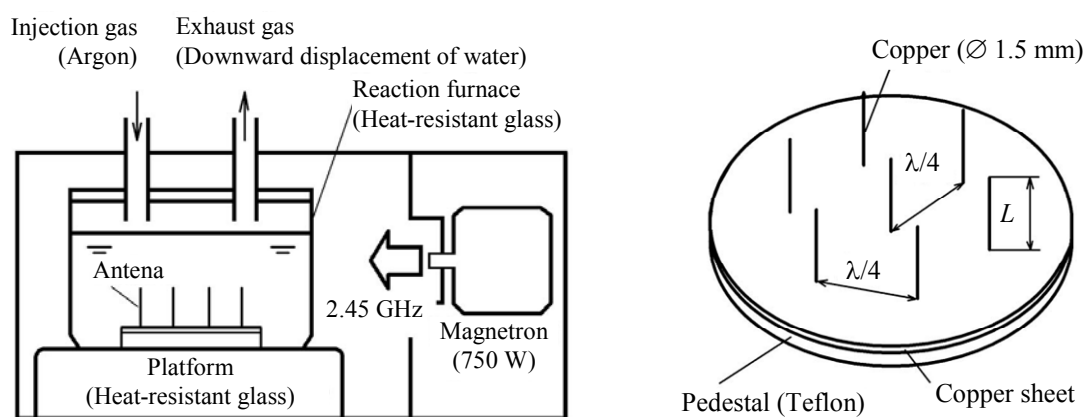


Рис. 11. Схема экспериментальной установки с использованием бытовой микроволновой печи (слева) и антенная система (справа) [71]

Fig. 11. Schematic diagram of the experimental setup using a household microwave oven (left) and antenna system (right) [71]

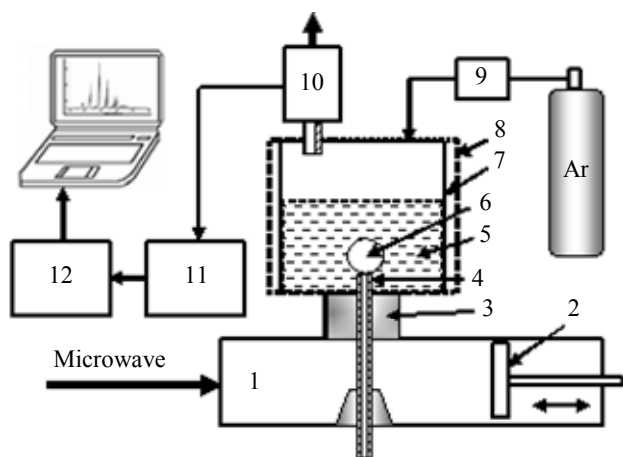


Рис. 12. Типичная схема экспериментальной установки для получения микроволнового разряда в жидких углеводородах с коаксиальным вводом энергии: 1 – коаксиально-волноводный переход, 2 – короткозамыкающий поршень, 3 – диэлектрик, 4 – антенна, 5 – жидкость, 6 – область разряда, 7 – кварцевый реактор, 8 – экран из металлической сетки, 9 – кран, 10 – отбор пробы, 11 – газовый хроматограф, 12 – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 12. Typical diagram of the experimental setup for obtaining a microwave discharge in liquid hydrocarbons with coaxial energy input: 1 – coaxial-to-waveguide junction, 2 – short-circuiting piston, 3 – dielectric, 4 – antenna, 5 – liquid, 6 – discharge region, 7 – quartz reactor, 8 – metal mesh screen, 9 – tap, 10 – sample collection, 11 – gas chromatograph, 12 – analog-to-digital converter)

Разрядная секция представляет собой волноводно-коаксиальный переход, центральный проводник которой служит антенной для ввода СВЧ-энергии в разрядную секцию. Для согласования используется перемещаемый короткозамыкающий поршень. Разряд создается в газовом пузыре у конца антенны в камере, заполненной жидкостью. Газовый пузырь создается либо из-за нагрева антенны микроволновым полем и испарения жидкости у конца антенны, либо подачей дополнительного газа через канал в центральном проводнике коаксиальной линии. Дополнительного источника энергии для поджига разряда не требуется. Давление в газовом пузыре определяется давлением над поверхностью жидкости и может изменяться от мм. рт. ст. до атмосферного давления.

В [73] описаны результаты парового риформинга в микроволновом разряде в жидком *n*-додекане. Принципиальная схема разрядного устройства показана на рис. 12. Разряд зажигался при микроволновой мощности 150–300 Вт при давлении в реакторе 10 кПа. Пары воды подавались через канал в центральном электроде и их температура изменялась от 40 до 80 °С, расход паров от 1×10^{-3} г/с до 6×10^{-3} г/с. В случае парового риформинга к основным газовым продуктам, перечисленным выше, добавляется CO, скорость образования газовых продуктов возрастает в 1,4 раза. Содержание водорода в газовых продуктах находится в пределах 73–82 %. Добавление паров воды увеличивает эффективность образования водорода, которая при 250 Вт достигает $40 \text{ мм}^3/\text{Дж}$.

В [74] рассмотрено влияние метода ввода паров воды на эффективность получения водорода при паровом риформинге в микроволновом разряде в жидком *n*-додекане. Схема реактора показана на рис. 13. Она отличается от приведенной на рис. 12 тем, что пары воды вводятся в систему не через канал в центральном электроде. А через отверстие в горизонтально расположенной тонкой трубке. Она расположена так, что охватывается газовым пузырем, образующимся у конца центрального электрода. Источником плазмы является генератор с частотой 27,12 МГц с мощностью от 200 до 500 Вт. Трубка греется в плазме и вода в ней испаряется (таким образом, не требуется дополнительного источника нагрева воды). Раз-

ряд зажигается при пониженном давлении, но в эксперименте давление в камере равняется атмосферному давлению.

Газовые продукты включают 55 % H_2 , 25 % CO, 1 % CO_2 и 19 % C_xH_y (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4). Энергетическая эффективность образования водорода $0,28 \text{ мм}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

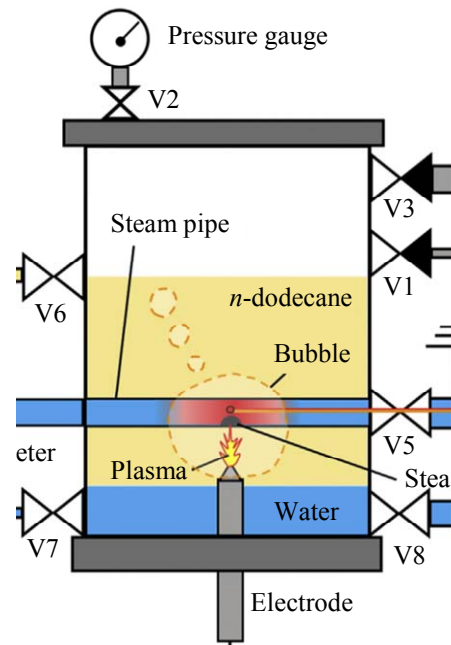


Рис. 13. Схема реактора из [74]
Fig. 13. Reactor diagram from [74]

В [75] описан другой подход к организации парового риформинга метана, в котором СВЧ-разряд создавался в объеме воды, а метан подавался через канал в антенне. Исследования велись при атмосферном давлении над поверхностью жидкости в диапазоне мощностей 500–650 Вт и расходов CH_4 25–75 мл/мин. Результаты представлены в табл. 2.

В [82] представлен результат получения горючих газов в жидких углеводородах (*n*-додекан, бензол, промышленные масла для жарки, машинное масло, отходы этих масел) в комбинированной плазменной системе, в которой плазма создается микроволновым излучением (2,45 ГГц) в присутствии ультразвукового воздействия (25,5 кГц, 10–40 Вт) при давлении 1–250 гПа (рис. 14). После откачки давление в камере поддерживалось добавлением аргона или азота в пространство над жидкостью. Ультразвуковое излучение вводилось в жидкость с помощью конической антенны и оно создавало первичные пузыри в жидкости. После зажигания разряда разряд

могу существовать после прекращения действия ультразвукового облучения. По отношению интенсивностей линий излучения атомов водорода определена температура электронов в плазме (~5000 К) и она не зависит от интенсивности ультразвукового облучения. В то же время абсолютные значения интенсивностей излучения атомов растут при наложении ультразвуковых волн, что свидетельствует об интенсификации химических процессов. В н-додекане концентрация водо-

рода в смеси образующихся газов достигает 81 %, за первые 10 секунд образовано 56 мл водорода. В дальнейшем скорость образования газов уменьшается и разряд прекращается. Это связано с образованием углеродсодержащих твердых продуктов в плазме. Фактическое производство водорода на единицу энергии по этому процессу соответствует примерно 1 % от обычного метода парового риформинга и около 30 % от эффективности электролиза воды.

Таблица 2

Сопоставление некоторых из известных результатов по получению водорода плазме

	Метод получения	Исходный состав	H ₂ (м ³)/кВт·ч	H ₂ (%)	CO (%)	Ссылка
Промышленные	Электролиз воды Паровой риформинг	H ₂ O	0,2–0,23	100	0	76
		CH ₄ + H ₂ O	0,67			77
Плазма	Барьерный разряд СВЧ-плазма с катализатором Дуга с соплом Лавалья СВЧ (2,45 ГГц) плазма СВЧ (915 МГц) плазма Барьерный разряд Дуга	CH ₄ + CO ₂	0,056			78
		CH ₄ + CO ₂	0,7			79
		C ₂ H ₅ OH + H ₂ O	1,12			80
		C ₂ H ₅ OH + Ar	0,015			81
		C ₂ H ₅ OH + N ₂	0,25			79
		C ₂₀ H ₂₂	0,01	35		82
		Горючее			25	
Паровой риформинг		C ₁₂ H ₂₆ + H ₂ O		70	8	84
		Дизель + H ₂ O		71	11	85
Плазма в жидкости	СВЧ-разряд СВЧ-разряд СВЧ-разряд ВЧ-разряд (27,12 МГц) СВЧ-разряд	C ₁₂ H ₂₆	0,13	74		71
		C ₁₂ H ₂₆	0,1	82,5		73
		C ₁₂ H ₂₆ + H ₂ O	0,14	79,3	4,6	74
		C ₁₂ H ₂₆ + H ₂ O	0,28	55	25	
		CH ₄ + H ₂ O	0/025	75	< 7	75

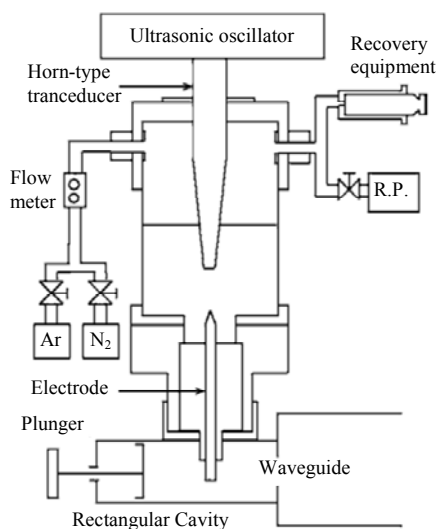


Рис. 14. Схема экспериментальной установки из [86]

Fig. 14. Schematic diagram of the experimental setup from [86]

Дополнительную информацию по свойствам и применению разрядов в жидких углеводородах и спиртах можно найти в [87–92].

В [83] описаны результаты исследования возможностей переработки тяжелых жидких углеводородов при атмосферном давлении в легкие фракции в дуговом разряде с вращающимися электродами, утопленными в углеводородное сырье. В качестве сырья использован мазут. Разряд создавался регулируемым источником выпрямленного напряжения до 50 В и током от 60 до 300 А. В выделившихся газах порядка 25 % приходится на водород, более 40 % – на этилен, около 7 % – на метан. Кроме газообразных продуктов были получены углеродные наноматериалы, состоящие на 70 % из многостенных углеродных нанотрубок.

В [93, 94] для получения водорода использовалась форма разряда, возникающая при воздействии на водную эмульсию акустических колебаний, приводящих к кавитации. Эксперименты показали, что в результате разложения жидких углеводородов в акустоплазменном разряде образуются твердофазные углеродсодержащие продукты, происходят химические превращения в жидкой фазе и образуется водородосодержащий горючий газ. Содержание водорода в газовой смеси в гексане, толуоле, эмульсии битум/вода было 80–85 %, скорость образования газовой смеси 1,0–15 л/мин.

Акустоплазменный метод получения водорода из водно-углеводородных эмульсий имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами, особенно с теми, которые в качестве сырья требуют наличия чистых веществ. При сравнимой производи-

тельности и чистоте получаемого водорода такой подход дает возможность использования широкого спектра дешевых исходных веществ, в том числе, различных водно-органических смесей и эмульсий, которые являются промышленными отходами химических производств.

В последнее время в качестве потенциального источника природного газа большой емкости рассматриваются газогидраты. Они представляют собой кристаллические соединения воды и метана, существующие при низких температурах и высоком давлении [95].

Плазма в жидкостях была использована для получения водорода из газогидратов [96, 97]. Процесс проводился в ВЧ- и микроволновом разрядах и проходил стадию плавления и перехода в жидкую фазу при атмосферном давлении. В экспериментах использовались искусственно полученные газогидраты. Перед экспериментами разрядная полость продувалась аргоном для удаления воздуха, аргон использовался для вытеснения образующихся в процессе газов, состав которых анализировался на хроматографе. ВЧ-разряд (27,12 МГц, 300–360 Вт) создавался между двумя вольфрамовыми электродами в жидком газогидрате в керамической трубке (рис. 15).

В экспериментах с микроволновым разрядом использовалась обычная микроволновая печь (2,45 ГГц, 700 Вт) (рис. 16). Использовалась система с несколькими антеннами. Отличие её от приведенной на рисунке заключается в том, что антенны с держателем помещены в верхней части реактора и их концы погружены в жидкость. Разряд горит на концах каждой антенны.

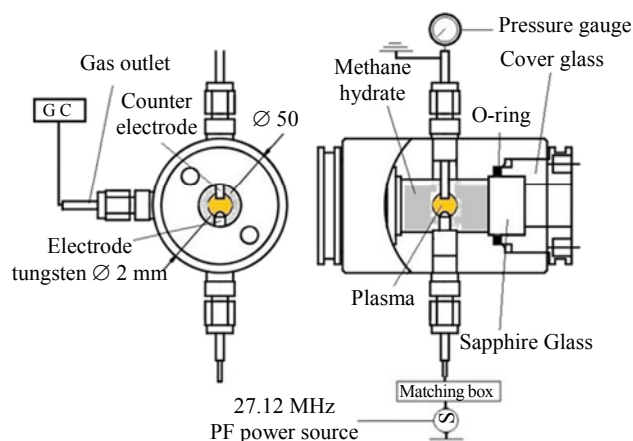


Рис. 15. Схема экспериментальной установки по созданию ВЧ-разряда в газогидратах [96]

Fig. 15. Schematic diagram of the experimental setup for creating an RF discharge in gas hydrates [96]

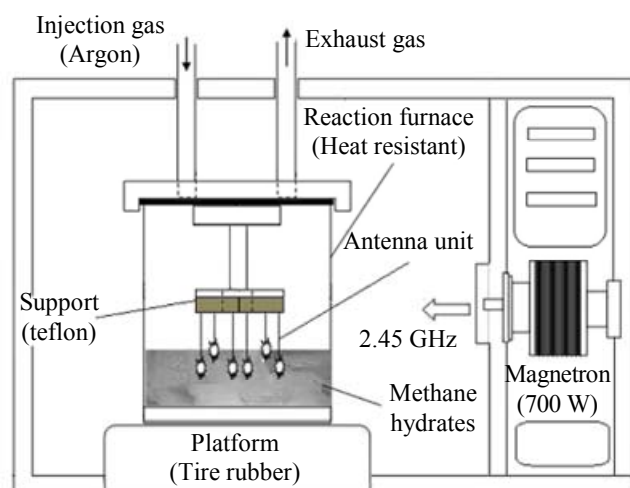


Рис. 16. Схема экспериментальной установки по созданию СВЧ-разряда в газогидратах [96]

Fig. 16. Schematic diagram of the experimental setup for creating a microwave discharge in gas hydrates [96]

Основными продуктами разрядов были H_2 и CO , кроме того, в продуктах содержались малые количества CO_2 , CH_4 , C_xH_y и углерода. Сделан вывод о том, что скорость выделения CH_4 из газогидрата в микроволновой плазме больше, чем в ВЧ-разряде. В отходящих газах обоих разрядов содержится неразложившийся метан. Эффективность получения водорода в ВЧ-разряде выше, чем в микроволновом разряде: в ВЧ-разряде в отходящих газах содержится 64,2 % водорода, а в микроволновом разряде.

Дополнительную информацию по разрядам в спиртах можно получить, например, из [98–108].

4. Заключение

Плазма используется для конверсии многих водородсодержащих соединений в различные полезные продукты более века, но только в последние десятилетия начались широкие и детальные экспериментальные и теоретические исследования в этой области. Появилась и изучается концепция плазменного катализа как возможного пути для улучшения или замены традиционного термического и каталитического риформинга в этих целях. Проводится изучение механизмов, описывающих участие и роль активных частиц плазмы в реакциях риформинга различных соединений. Но задача еще далека от полного понимания. Зачастую ограничения в моделирова-

нии связаны с отсутствием характеристик, описывающих взаимодействие частиц сложного состава в плазме. Необходим учет ионно-молекулярных реакций, причем во многих случаях в системе появляются отрицательные ионы, учет которых тоже необходим. Важным является и то, что в плазме появляется твердая фаза, а для ее корректного описания необходимо учитывать заряды этих частиц в плазме. Все эти задачи требуют больших усилий при исследовании.

Большую перспективу имеют комбинированные системы с плазмой и катализаторами. На этом пути тоже много проблем, поскольку принципы использования традиционного катализа могут быть не применимы для применения катализаторов в плазме. Нужна разработка подходов для создания таких специализированных катализаторов.

Основным методом получения водорода в настоящее время является паровой риформинг природного газа. Энергетический выход водорода при использовании этого метода составляет 60 г(H_2)/кВт·ч. Эта цифра в США принята реперной для сравнения другими технологиями получения водорода на ближайшее время. Системы плазменного риформинга, которые показали лучшие результаты на данный момент, используют стабилизированную вихревую скользющую дугу или микроволновый разряд [6, 109].

Первый разряд легче реализовать с помощью простого и недорогого источника постоянного тока; однако потенциальным ограничением систем скользящей дуги является возможность работы в энергозатратном режиме термической плазменной дуги. СВЧ-плазма лучший выбор для риформинга топлива, потому что она сильно неравновесна и имеет высокую удельную мощность – это два самых важных требования, которые необходимы реализации эффекта плазменного катализа. С другой стороны, микроволновые плазменные системы требуют сложных (и дорогих) блоков питания и выполнения специальных требований по обеспечению их работы (но эта проблема будет уменьшаться по мере разработки новых технологий электроники). Это является существенным их недостатком по сравнению со скользящей дугой на сегодняшний день.

В то же время использование СВЧ-разрядов имеет ряд очевидных преимуществ [110].

Это широкий диапазон рабочих давлений (от долей Торр до давлений, превышающих атмосферное давление, широкий диапазон удельной поглощенной мощности (0,1–10 Вт/см), возможность управления внутренней структурой плазмы созданием специальных электродинамических систем, возможность создания плазмы в малых и больших объемах, возможность организации воздействия СВЧ-энергии на твердые частицы, образующиеся в разряде (сюда же относится и, так называемая, микроволновая химия). Другими словами, СВЧ-системы являются более гибкими при создании устройств для различных применений.

Если рассматривать возможность выбора между разрядами в газовой и жидкой фазах, то эта проблема требует дальнейших исследований, поскольку если по разрядам в газах имеется обширная научная литература, то информации по разрядам в жидкостях значительно меньше.

Перспективным направлением является сочетание плазменной и традиционной каталитической технологии. Такое сочетание может уменьшить недостатки, присущие каждой технологии.

Очевидно, что, несмотря на большую, на сегодняшний день эффективность действующих технологий, плазменные технологии имеют значительное преимущество благодаря их простоте, компактности, отсутствию необходимости в катализаторах, малым временам переходных процессов и невысокой цене [10]. Это может быть определяющим при выборе технологического решения для решения конкретных прикладных задач.

Исследование выполнено в рамках Госзадания
ИНХС РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехтер А. Б. Химические реакции в электрическом разряде. – Ленинград, ОНТИ, Главная редакция общетехнической литературы, 1935.
2. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме / под ред. Полака Л. С. – М.: Наука, 1965.
3. Теоретическая и прикладная плазмохимия / под ред. Полака Л. С. – М.: Наука, 1975.

4. Slovetkii D. I. / High Energy Chem. 2006. Vol. 40. № 2. P. 86.
5. Pushkarev A. I., Zhu A-M., Li X-S., Sazonov R. V. / High Energy Chem. 2009. Vol. 43. № 3. P. 156.
6. Gallagher M. J., Jr., Fridman A. Chapter 8. Plasma Reforming for H₂-Rich Synthesis Gas, in Fuel cells: technologies for fuel processing / Edited by Shekhawat D., Spivey J. J., Berry D. A. – Elsevier, 2011. P. 223–259.
7. Nozaki T., Kameshima S., Sheng Z., Tamura K., Yamazaki T. Ch. 8. Plasma-Catalytic Conversion of Methane, in Plasma Catalysis, Xin Tu, J. Christopher Whitehead, Tomohiro Nozaki Editors. – Springer Nature Switzerland AG, 2019.
8. Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb Th. / ChemBioEng Rev. 2020. Vol. 7. № 5. P. 150.
9. Fridman A. Plasma chemistry. – New York: Cambridge University Press, 2008.
10. Cormier J. M., Rusu I. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2798.
11. Yan J., Du C. Hydrogen Generation from Ethanol using Plasma Reforming Technology, Green Energy and Technology. – Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017.
12. Булепа И. В., Лебедев Ю. А. / Нефтехимия. 2022. Т. 62. № 2. С. 154.
13. Budhraj N., Pal A., Mishra R. S. / Int. J. Hydrogen energy. 2023. Vol. 48. P. 2467.
14. Tijani M. E. H., Zondag H., Delft Y. Van / ACS Sustainable Chem. Eng. 2022. Vol. 10. P. 16070.
15. Zhao J., Wang D., Zhang L., He M., Ma W., Zhao S. / RSC Adv. 2023 Vol. 13. P. 15261.
16. Fridman A., Nester S., Kennedy L. A., Saveliev A., Mutaf-Yardimci O. / Prog. Energy Combust. Sci. 1999. Vol. 25. P. 211.
17. Paulmier T., Fulcheri L. / Chem. Eng. J. 2005. Vol. 106. P. 59.
18. Пушкарев А. И., Новоселов Ю. Н., Ремнев Г. Е. Цепные процессы в низкотемпературной плазме. – Новосибирск: Наука, 2006.
19. Deminsky M., Jivotov V., Potapkin B., Rusanov V. / Pure Appl. Chem. 2002. Vol. 74. № 3 P. 413.
20. Животов В. К., Потопкин Б. В., Русанов В. Д. Плазменный катализ – явление и приложения: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том VIII-1 Химия низкотемпературной плазмы / под ред. Лебедева Ю. А., Платэ Н. А., Фортова В. Е. – М.: Янус-К, 2005. С. 4–36.
21. Русанов В. Д., Бабарицкий А. И., Баранов Е. И., Дёмкин С. А. и др. // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354. № 2. С. 1.
22. Бабарицкий А. И., Баранов Е. И., Деминский М. А., Дёмкин С. А. и др. / Химия Высоких Энергий. 1999. Т. 33. № 1. С. 59.
23. Бабарицкий А. И., Баранов Е. И., Дёмкин С. А., Животов В. К. и др. / Химия Высоких Энергий. 1999. Т. 33. № 6. С. 458.
24. Babaritskyi A., Deminsky M., Gerasimov E., Dyomkin S., et al. Microwave Reactors for Plasma Catalysis / Microwave Discharge: Fundamental and Applications / Ed. by Lebedev Yu. A. – М.: Yanus-K, 2001. P. 187–196.
25. Бабарицкий А. И., Баранов И. Е., Бибицков М. Б., Дёмкин С. А. и др. Разработка бортового ав-

- томогибного плазменного конвертора жидкого топлива в синтез-газ / Препринт РНЦ КИ. ИАЭ 63/0213. 2003.
26. Carreon M. L. / Plasma Res. Express. 2019. Vol. 1. P. 043001.
27. Plasma Catalysis / Xin Tu, J. Christopher Whitehead, Tomohiro Nozaki Editors – Springer Nature Switzerland AG/ 2019.
28. Chen H. L., Lee H. M., Chen S. H., Chao Y., Chang M. B. / Catal. B: Env. 2008. Vol. 85. P. 1.
29. Yan J., Du C. Hydrogen Generation from Ethanol Using Plasma Reforming Technology, Hangzhou. – Springer, 2017.
30. Chung W.-C., Chang M.-B. / Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 62. P. 13.
31. Mizeraczyk J., Jasiński M., Dors M., Zakrzewski Z. / AIP Conference Proceedings. 2008. Vol. 993. P. 287.
32. Jasiński M., Dors M., Nowakowska H., Nichipor G. V., Mizeraczyk J. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. № 19. P. 194002.
33. Czyłkowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasiński M., et al. / NUKLEONIKA. 2016. Vol. 61. № 2. P. 185.
34. Mizeraczyk J., Jasiński M., Nowakowska H., Dors M. / NUKLEONIKA. 2012. Vol. 57. № 2. P. 241.
35. Miotk R., Jasiński M., Mizeraczyk J. / Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 035011.
36. Zherlitsyn A. G., Shiyun V. P., Demchenko P. V. / Resource-Efficient Technologies. 2016. Vol. 2. P. 11.
37. Spath P. L., Mann M. K. / National Renewable Energy Laboratory Technical Report. NREL/TP-570-27637. 2001.
38. Hodges A., Hoang A. L., Tsekouras G., et al. / Nat. Commun. 2022. Vol. 13. P. 1304.
39. Heintze M., Pietruszka B. / Catal. Today. 2004. Vol. 89. P. 21.
40. Cormie I. M., Rusu I. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2798.
41. Hrycak B., Czyłkowski D., Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J. / Plasma Chem. Plasma Proc. 2019. Vol. 39. P. 695.
42. Zherlitsyn A. G., Shiyun V. P., Demchenko P. V. / Resource-Efficient Technol. 2016. Vol. 2. P. 11.
43. Жерлицын А. Г., Корженко Д. В., Шиян В. П. / Газовая промышленность. 2018. № 11. С. 104.
44. Zhu X., Liu X., Lian H.-Y., Liu J.-L., Li X.-S. / Catal. Today. 2019. Vol. 337. P. 69.
45. Wang B., Peng Y., Yao S. I. / Int. J. of Hydr. Energy. 2019. Vol. 44. P. 22831.
46. Martin del Campo J., Coulombe S., Kopyscinski J. / Plasma Chem. and Plasma Proc. 2020. Vol. 40. P. 857.
47. Bromberg L., Cohn D. R., Rabinovich A., Alexeev N., et al. / PSFC JA-06-3 MIT Plasma Science and Fusion Center February 6, 2006.
48. Zhou Z.-P., Zhang J.-M., Ye T.-H., Zhao P.-H. / Chinese Sci Bull. 2011. Vol. 56. P. 2162.
49. Nishida Y., Cheng C.-Z., Iwasaki K. / IEEE Trans. on Plasma Sci. 2014. Vol. 42. P. 3674.
50. Kudryashov S. V., Ryabov A. Yu., Ochered'ko A. N. / High Energy Chem. 2017. Vol. 51. № 2. P. 128.
51. Ryabov A. Yu., Kudryashov S. V., Ochered'ko A. N. / Petroleum Chem. 2020. Vol. 60. № 3. P. 380.
52. Taghvae H., Jahanmir A., Reza Rahimpour M., Mohamadzadeh Shirazi M., Hooshmand N. / Chem. Eng. J. 2013. Vol. 226. P. 384.
53. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, вводный том IV / под ред. Фортова В. Е. – М.: Наука, 2000. С. 436–445.
54. Шарафутлинов П. Г., Зарвин А. Е., Мадурбаев В. Ж. и др. / Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. С. 23.
55. Bruggeman P., Leys C. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009 Vol. 42. P. 053001.
56. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 253001.
57. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., et al. / Plasma Sources Sci. and Technol. 2016. Vol. 25. P. 053002.
58. Adamovich I., Baalrud S. D., Bogaerts A., Bruggeman P. J., et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. P. 323001.
59. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., et al. / J. of Phys. D: Appl. Phys. 2022. Vol. 55. P. 373001.
60. Lebedev Yu. A. / Plasma Phys. Rep. 2017. Vol. 43. P. 676.
61. Horikoshi S., Serpone N. / RSC Adv. 2017. Vol. 7. P. 47196.
62. Lebedev Yu. A. / High Temp. 2018. Vol. 56. № 5. P. 811.
63. Lebedev Yu. A. / Polymers. 2021. Vol. 13. № 11. P. 1678.
64. Averin K. A., Bilera I. V., Lebedev Yu. A., Shakhatov V. A., Epstein I. L. / Plasma Process Polym. 2019. Vol. 16. P. e1800198.
65. Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Yamashita H., et al. / J. of Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 073306.
66. Nomura S., Toyota H., Tawara M., Yamashita H. / Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 231502.
67. Mochtar A., Nomura S., Mukasa S., Toyota H. / J. Jap. Inst of Energy. 2017. Vol. 96. № 3. P. 86.
68. Shiraishi R., Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Amano Y. / Int. J. Hydr. Energy. 2019. Vol. 44. P. 16248.
69. Nomura S., Toyota H., Tawara M., Yamashita H. / Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 231502.
70. Lebedev Yu. A., Averin K. A., Tatarinov A. V. / High Energy Chem. 2019. Vol. 54. № 4. P. 331.
71. Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Yamashita H. / J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 073306.
72. Toyota H., Nomura S., Mukasa S. / Int. J. Mater. Sci. and Appl. 2013. Vol. 2. № 3. P. 83.
73. Mochtar A. A., Nomura S., Mukasa S., Toyota H. / J. Jap. Inst of Energy. 2017. Vol. 96. № 3. P. 86.
74. Shiraishi R., Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Amano Y. / Int. J. Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. P. 16248.
75. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Epstein I. L., et al. / Plasma Process Polym. 2024. Vol. 21. P. e2400139.
76. Pascuzzi S., Anifantis A. S., Blanco I., Mugnozga G. S. / Sustain Times. 2016. Vol. 8. P. 1.
77. Randolph K. / Annual merit review and peer evaluation meeting. – U.S.: DOE. 2013.
78. Dors M., Izdebski T., Berendt J. M. A. / Int. J. Plasma Environ Sci Technol. 2012. Vol. 6. P. 93.
79. Mizeraczyk J. MJ. / Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2016. Vol. 75. P. 24702.

80. Du C., Li H., Zhang L., Wang J., Huang D., Xiao M., et al. / Int. J. Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 8318.
81. Henriques J., Bundaleska N., Tatarova E., Dias F. M. / Int. J. Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36. P. 345.
82. Song Feilong, Wu Yun, Xu Shida, Di Jin MJ. / Int. J. Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. P. 3569.
83. Ганиева P., Тимеркаев Б. А. / Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 6. С. 651.
84. Takeda Y., Kusumi M., Masaaki K., Shinoki T., et al. / Proc. 15th Int. Conf. on Fuel Cell Sci. Eng. and Technol. 2017.
85. Martin S., Kraaij G., Ascher T., Baltzopoulou P., et al. / Int. J. Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. P. 75.
86. Nomura S., Toyota H., Tawara M., Yamashita H., Matsumoto K. / Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 231502.
87. Yu Z., Sun B., Ding G., Liu J., Zhu X., Xin Y. / J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2025. Vol. 190. P. 107119.
88. Zhu T., Sun B., Zhu X., Wang L., Xin Y., Liu J. / J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2021. Vol. 156. P. 105111.
89. Wang B., Sun B., Zhu X., Yan Z. / Int. J. Hydr. Energy. 2016. Vol. 41. P. 7280.
90. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Yu. A., Epstein I. L. / Plasma. Process. Polym. 2023. Vol. 20. Iss. 6. P. e2300015.
91. Lebedev Yu. A., Averin K. A. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 214005.
92. Timerkaev B. A., Galeeva I. G., Andreev N. G., Farhutdinov G. R. / High Energy Chem. 2024. Vol. 58. Suppl. 3. P. S451.
93. Бульчев Н. А., Кириченко М. Н., Казарян М. А. / Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2018. № 16-18. С. 264.
94. Bulychev N. A. / Int. J. of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. P. 21298.
95. Koh C. A., Sloan E. D., Sum A. K., Wu D. T. / Ann. Rev. Chem. Biomol. Eng. 2011. Vol. 2. P. 237.
96. Putra A. E. E., Nomura S., Mukasa S., Toyota H. / Int. J. of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. Iss. 21. P. 16000.
97. Rahim S., Nomura S., Mukasa S., Toyota H. / Appl. Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. P. 120.
98. Nedybaliuk O. A., Chernyak V. Y., Fedirchuk I. I., Demchina V. P., et al. / Questions of atomic science and technology. 2016. Vol. 6. P. 276.
99. Lian H. Y., Liu J. L., Li X. S., Zhu X., et al. / Engineering J. 2019. Vol. 369. P. 245.
100. Wang B., Lü Y., Zhang X., Hu S. / J. Natural Gas Chem. 2011. Vol. 20. P. 151.
101. Henriques J., Bundaleska N., Tatarova E., et al. / Int. J. Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36. P. 345.
102. Tatarova E., Bundaleska N., Dias F. M., Tsyganov D., et al. / Plasma Sources Sci. & Technol. 2013. Vol. 22. P. 065001.
103. Wang Y. F., You Y. S., Tsai C. H., Wang L. C. / Int. J. Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35. P. 9637.
104. Hrycak B., Czykowski D., Miotk R., Dors M., et al. / Open Chem. 2015. Vol. 13. P. 317.
105. Miotk R., Hrycak B., Czykowski D., Dors M., et al. / Plasma Sources Sci. & Technol. 2016. Vol. 25. P. 035022.
106. Bardos L., Baránková H., Bardos A. / Plasma Chem. Plasma Proc. 2017. Vol. 37. P. 115.
107. Liu J., Xin Y., Yang Y., Wang Q., et al. / J. Environ. Chem. Eng. 2025. Vol. 13. P. 117106.
108. Liu J.-L., Zhu T. H., Sun B. / Int. J. Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. P. 12841.
109. Mizeraczyk J., Urashima K., Jasinski M., Dors M. / Int. J. of Plasma Environmental Sci. & Technol. 2014. Vol. 8. P. 89.
110. Lebedev Yu. A. / Plasma Sources Sci. and Technol. 2015. Vol. 24. P. 053001.

PACS: 52.77.-j, 82.30.Lp

Electrical discharges in hydrogen-containing gases and liquids (review)

Yu. A. Lebedev

*A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119991 Russia
E-mail: lebedev@ips.ac.ru*

Received 12.12.2025; revised 23.01.2026; accepted 20.02.2026

This review contains information on a variety of implemented methods for creating low-temperature plasma used to convert hydrocarbons and alcohols into useful products (hydrogen, acetylene). Examples of plasma generation devices based on arc, barrier, electron-beam, and microwave discharges in both gaseous and liquid environments are provided.

Keywords: electric discharge, plasma generators, plasma chemistry, hydrogen production.

REFERENCES

1. Shekhter A. B., Chemical reactions in electric discharges, Leningrad, ONTI, Main editorial board of general technical literature, 1935 [in Russian].
2. Kinetics and thermodynamics of chemical reactions in low-temperature plasma /ed. Polak L. S., Moscow, Nauka, 1965 [in Russian].
3. Theoretical and applied plasma chemistry /ed. Polak L. S., Moscow, Nauka, 1975 [in Russian].
4. Slovetskii D. I., High Energy Chem. **40** (2), 86 (2006).
5. Pushkarev A. I., Zhu A.-M., Li X.-S., and Sazonov R. V., High Energy Chem. **43** (3), 156 (2009).
6. Gallagher M. J., Jr., and Fridman A. Chapter 8. Plasma Reforming for H₂-Rich Synthesis Gas, in Fuel cells: technologies for fuel processing, ed. Shekhawat D., Spivey J. J., Berry D. A., Elsevier, 2011, pp. 223–259.
7. Nozaki T., Kameshima S., Sheng Z., Tamura K., and Yamazaki T., Chapter 8. Plasma-Catalytic Conversion of Methane, in Plasma Catalysis / eds. Xin Tu, Whitehead J. C., Nozaki T., Springer Nature Switzerland AG 2019.
8. Schneider S., Bajohr S., Graf F., and Kolb Th., ChemBioEng Rev. **7** (5) 150 (2020).
9. Fridman A., Plasma chemistry, New York, Cambridge University Press, 2008.
10. Cormier J. M. and Rusu I., J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 2798 (2001).
11. Yan J. and Du C., Hydrogen Generation from Ethanol using Plasma Reforming Technology, Green Energy and Technology, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017.
12. Bilera I. V. and Lebedev Yu. A., Petroleum Chem. **62** (4), 329 (2022).
13. Budhrajana N., Pal A., and Mishra R. S., Int. J. Hydrogen energy **48**, 2467 (2023).
14. Tijani M. E. H., Zondag H., and Delft Y. Van, ACS Sustainable Chem. Eng. **10**, 16070 (2022).
15. Zhao J., Wang D., Zhang L., He M., Ma W., and Zhao S., RSC Adv. **13**, 15261 (2023).
16. Fridman A., Nester S., Kennedy L. A., Save- live A., and Mutaf-Yardimci O., Prog. Energy Combust. Sci. **25**, 211 (1999).
17. Paulmier T. and Fulcheri L., Chem. Eng. J. **106**, 59 (2005).
18. Pushkariev A. I., Novoselov Yu. N., and Remnev G. E., Chain processes in low-temperature plasma. Novosibirsk, Nauka, 2006 [in Russian].
19. Deminsky M., Jivotov V., Potapkin B., and Rusanov V., Pure Appl. Chem. **74** (3), 413 (2002).
20. Jivotov V. K., Potapkin B. V., and Rusanov V. D., Plasma catalysis – phenomenon and applications / Encyclopedia of Low-Temperature Plasma, Subject Vol. VIII-1 Low-Temperature Plasma Chemistry, eds. Lebedev Yu. A., Plate N. A., Fortov V. E. Moscow, Yanus-K, 2005, pp. 4–36.
21. Rusanov V. D., Babaritskii A. I., Baranov E. I., Diomkin S. A., et al., Doklady Academy of Sciences, **354** (2), 1 (1997) [in Russian].
22. Babaritskii A. I., Baranov E. I., Deminskii M. A., Diomkin S. A., et al., High Energy Chem. **33** (1), 59 (1999).
23. Babaritskii A. I., Baranov E. I., Diomkin S. A., Jivotov V. K., et al., High Energy Chem. **33** (6), 458 (1999).
24. Babaritskyi A., Deminsky M., Gerasimov E., Dyomkin S. et al., Microwave Reactors for Plasma Catalysis / Microwave Discharges: Fundamental and Applications / ed. Lebedev Yu. A. Moscow, Yanus-K, 2001, pp. 187–196.
25. Babaritskii A. I., Baranov I. E., Bibikov M. B., Diomkin S. A., et al., Development of an on-board automotive plasma converter of liquid fuel into synthesis gas. Preprint RRC KI. IAE 63/0213. 2003.
26. Carreon M. L., Plasma Res. Express **1**, 043001 (2019).
27. Plasma Catalysis / ed. Xin Tu, Whitehead J. C., Nozaki T. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
28. Chen H. L., Lee H. M., Chen S. H., Chao Y., and Chang M. B., Catal. B: Env. **85**, 1 (2008).
29. Chung W.-C. and Chang M.-B., Renewable and Sustainable Energy Reviews **62**, 13 (2016).
30. Yan J. and Du C., Hydrogen Generation from Ethanol Using Plasma Reforming Technology, Hangzhou, Springer 2017.
31. Mizeraczyk J., Jasinski M., Dors M., and Zakrzewski Z., AIP Conference Proceedings **993**, 287 (2008).
32. Jasiński M., Dors M., Nowakowska H., Nichipor G. V., and Mizeraczyk J., J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (19), 194002 (2011).
33. Czyłkowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasiński M., et al., NUKLEONIKA **61** (2), 185 (2016).
34. Mizeraczyk J., Jasiński M., Nowakowska H., and Dors M., NUKLEONIKA **57** (2), 241 (2012).
35. Miotk R., Jasiński M., and Mizeraczyk J., Plasma Sources Sci. Technol. **27**, 035011 (2018).
36. Zherlitsyn A. G., Shiyani V. P., and Demchenko P. V., Resource-Efficient Technologies **2**, 11 (2016).
37. Spath P. L. and Mann M. K., National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-570-27637, 2001.
38. Hodges A., Hoang A. L., Tsekouras G. et al., Nat. Commun. **13**, 1304 (2022).
39. Heintze M. and Pietruszka B., Catal. Today **89**, 21 (2004).
40. Cormie I. M. and Rusu I., J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 2798 (2001).
41. Hrycak B., Czyłkowski D., Jasiński M., Dors M., and Mizeraczyk J., Plasma Chem. Plasma Proc. **39**, 695 (2019).
42. Zherlitsyn A. G., Shiyani V. P. and Demchenko P. V., Resource-Efficient Technol. **2**, 11 (2016).
43. Zherlitsyn A. G., Korgenko D. V., and Shiyani V. P., Gas Industry, № 11, 104 (2018) [in Russian].
44. Zhu X., Liu X., Lian H.-Y., Liu J.-L., and Li X.-S., Catal. Today **337**, 69 (2019).
45. Wang B., Peng Y., and Yao S. I., Int. J. of Hydr. Energy. **4**, 22831 (2019).
46. Martin del Campo J., Coulombe S., and Kopycinski J., Plasma Chem. and Plasma Proc. **40**, 857 (2020).

47. Bromberg L., Cohn D. R., Rabinovich A., Alexeev N., et al., PSFC JA-06-3 MIT Plasma Science and Fusion Center, February 6, 2006.
48. Zhou Z.-P., Zhang J.-M., Ye T.-H., and Zhao P.-H., *Chinese Sci Bull.* **56**, 2162 (2011).
49. Nishida Y., Cheng C.-Z., and Iwasaki K., *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **42**, 3674 (2014).
50. Kudryashov S. V., Ryabov A. Yu., and Ochered'ko A. N., *High Energy Chem.* **51** (2), 128 (2017).
51. Ryabov A. Yu., Kudryashov S. V., and Ochered'ko A. N., *Petroleum Chem.* **60** (3), 380 (2020).
52. Taghvae H., Jahanmir A., Reza Rahimpour M., Mohamadzadeh Shirazi M., and Hooshmand N., *Chem. Eng. J.* **226**, 384 (2013).
53. *Encyclopedia of Low-Temperature Plasma*, Vol. IV / ed. Fortov V. E. Moscow, Nauka, 2000, pp. 436–445.
54. Sharafutdinov R. G., Zarvin A. E., Madirbaev B. G., et al., *J. Tech. Phys. Letters* **31**, 23 (2005).
55. Bruggeman P., Leys C., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 053001 (2009).
56. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 253001 (2012).
57. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., et al., *Plasma Sources Sci. and Technol.* **25**, 053002 (2016).
58. Adamovich I., Baalrud S. D., Bogaerts A., Bruggeman P. J., et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 323001 (2017).
59. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., et al., *J. of Phys. D: Appl. Phys.* **55**, 373001 (2022).
60. Lebedev Yu. A., *Plasma Phys. Rep.* **43**, 676 (2017).
61. Horikoshi S. and Serpone N., *RSC Adv.* **7**, 47196 (2017).
62. Lebedev Yu. A., *High Temp.* **56** (5), 811 (2018).
63. Lebedev Yu. A., *Polymers.* **13** (11), 1678 (2021).
64. Averin K. A., Bilera I. V., Lebedev Yu. A., Shakhmatov V. A., and Epstein I. L., *Plasma Process Polym.* **16**, e1800198 (2019).
65. Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Yamashita H., et al., *J. of Appl. Phys.* **106**, 073306 (2009).
66. Nomura S., Toyota H., Tawara M., and Yamashita H., *Appl. Phys. Lett.* **88**, 231502 (2006).
67. Mochtar A., Nomura S., Mukasa S., and Toyota H., *J. Jap. Inst of Energy.* **96** (3), 86 (2017).
68. Shiraishi R., Nomura S., Toyota H., Mukasa S., and Amano Y., *Int. J. Hydr. Energy.* **44**, 6248 (2019).
69. Nomura S., Toyota H., Tawara M., and Yamashita H., *Appl. Phys. Lett.* **88**, 231502 (2006).
70. Lebedev Yu. A., Averin K. A., and Tatarinov A. V., *High Energy Chem.* **54** (4), 331 (2019).
71. Nomura S., Toyota H., Mukasa S., and Yamashita H., *J. Appl. Phys.* **106**, 073306 (2009).
72. Toyota H., Nomura S., and Mukasa S., *Int. J. Mater. Sci. and Appl.* **2** (3), **83** (2013).
73. Mochtar A. A., Nomura S., Mukasa S., and Toyota H., *J. Jap. Inst of Energy.* **96** (3), 86 (2017).
74. Shiraishi R., Nomura S., Toyota H., Mukasa S., Amano Y., *Int. J. Hydrogen Energy* **44**, 16248 (2019).
75. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Epstein I. L., et al., *Plasma Process Polym.* **21**, e2400139 (2024).
76. Pascuzzi S., Anifantis A. S., Blanco I., and Mugnoz-G. S., *Sustain Times* **8**, 1 (2016).
77. Randolph K. Annual merit review and peer evaluation meeting. U.S, DOE, 2013.
78. Dors M., Izdebski T., and Berendt J. M. A., *Int. J. Plasma Environ Sci Technol.* **6**, 93 (2012).
79. Mizeraczyk J. MJ., *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **75**, 24702 (2016).
80. Du C., Li H., Zhang L., Wang J., Huang D., Xiao M., et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **37**, 8318 (2012).
81. Henriques J., Bundaleska N., Tatarova E., and Dias F. M., *Int. J. Hydrogen Energy* **36**, 345 (2011).
82. Song Feilong, Wu Yun, Xu Shida, and Di Jin MJ., *Int. J. Hydrogen Energy* **44**, 3569 (2019).
83. Ganieva G. R. and Timerkaev B. A., *Petroleum Chem.* **56** (9), 869 (2016).
84. Takeda Y., Kusumi M., Masaaki K., Shinoki T., et al., *Proc. 15th Int. Conf. on Fuel Cell Sci., Eng. and Technol.* 2017.
85. Martin S., Kraaij G., Ascher T., Baltzopoulou P., et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **40**, 75 (2015).
86. Nomura S., Toyota H., Tawara M., Yamashita H., and Matsumoto K., *Appl. Phys. Lett.* **88**, 231502 (2006).
87. Yu Z., Sun B., Ding G., Liu J., Zhu X., and Xin Y., *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* **190**, 107119 (2025).
88. Zhu T., Sun B., Zhu X., Wang L., Xin Y., and Liu J., *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* **156**, 105111 (2021).
89. Wang B., Sun B., Zhu X., and Yan Z., *Int. J. Hydr. Energy.* **41**, 7280 (2016).
90. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Yu. A., and Epstein I. L., *Plasma. Process. Polym.* **20** (6) e2300015 (2023).
91. Lebedev Yu. A. and Averin K. A., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 214005 (2018).
92. Timerkaev B. A., Galeeva I. G., Andreev N. G., and Farhutdinov G. R., *High Energy Chem.* **58** (3), S451 (2024).
93. Bulychev N. A., Kirichenko M. N., and Kazarian M. A., *Int. Sci. J. Alternative Energy and Ecology*, № 16-18, 264 (2018) [in Russian].
94. Bulychev N. A., *Int. J. of Hydrogen Energy* **46**, 21298 (2021).
95. Koh C. A., Sloan E. D., Sum A. K., and Wu D. T., *Ann. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **2**, 237 (2011).
96. Putra A. E. E., Nomura S., Mukasa S., and Toyota H., *Int. J. of Hydrogen Energy* **37** (21), 16000 (2012).
97. Rahim S., Nomura S., Mukasa S., and Toyota H., *Appl. Thermal Engineering* **90**, 120 (2015).
98. Nedybaliuk O. A., Chernyak V. Y., Fedirchuk I. I., Demchina V. P., et al., *Questions of atomic science and technology* **6**, 276 (2016).
99. Lian H. Y., Liu J. L., Li X. S., Zhu X., et al., *Engineering J.* **369**, 245 (2019).
100. Wang B., Lü Y., Zhang X., and Hu S., *J. Natural Gas Chem.* **20**, 151 (2011).
101. Henriques J., Bundaleska N., Tatarova E., et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **36**, 345 (2011).
102. Tatarova E., Bundaleska N., Dias F. M., Tsyganov D., et al., *Plasma Sources Sci. & Technol.* **22**, 065001 (2013).

103. Wang Y. F., You Y. S., Tsai C. H., and Wang L. C., *Int. J. Hydrogen Energy* **35**, 9637 (2010).
104. Hrycak B., Czyrkowski D., Miotk R., Dors M., et al., *Open Chem.* **13**, 317 (2015).
105. Miotk R., Hrycak B., Czyrkowski D., Dors M., et al., *Plasma Sources Sci. & Technol.* **25**, 035022 (2016).
106. Bardos L., Baránková H., and Bardos A., *Plasma Chem. Plasma Proc.* **37**, 115 (2017).
107. Liu J., Xin Y., Yang Y., Wang Q., et al., *J. Environ. Chem. Eng.* **13**, 117106 (2025).
108. Liu J.-L., Zhu T. H., and Sun B. *Int. J. Hydrogen Energy* **47**, 12841 (2022).
109. Mizeraczyk J., Urashima K., Jasinski M., and Dors M., *Int. J. of Plasma Environmental Sci. & Technol.* **8**, 89 (2014).
110. Lebedev Yu. A., *Plasma Sources Sci. and Technol.* **24**, 053001 (2015).

Об авторе

Лебедев Юрий Анатольевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: lebedev@ips.ac.ru SPIN-код: 2509-0361, AuthorID: 34309