ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, Емельянова Олега Анатольевича на диссертационную работу Маланичева Виктора Евгеньевича «Исследование воздействия барьерного разряда на основные компоненты природного газа при атмосферном давлении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Целью данной работы является разработка и создание экспериментальной электрофизической установки на основе барьерного разряда, а также исследование, анализ и выявление закономерностей процесса воздействия барьерного разряда атмосферного давления на основные компоненты природного газа при питании разряда прямоугольными высоковольтными импульсами.

Актуальность темы диссертационной работы

Недавние исследования углеводородов во всем мире выявили множество традиционных и нетрадиционных запасов газа, такие как плотный газ, сланцевый газ, гидрат метана и метан угольных пластов. Однако около половины запасов природного газа расположены в удаленных районах, имеют низкий коммерческий интерес из-за дорогостоящей транспортировки, если они не могут эффективно быть преобразованными в продукты с добавленной стоимостью на месте. Устойчивый процесс преобразования этих запасов газа в химикаты и топливо с более высокой добавленной стоимостью в известной степени являются вызовом 21 века. Вместе с тем, проблема конверсии углеводородов (алканов) возникает и в экологических приложениях, поскольку алканы - самая большая категория летучих органических соединений, вызывающих экологические проблемы, такие как фотохимический смог, кислотные дожди и истощение озонового слоя, а также такие болезни, как детский лейкоз, астма и рак. Использование природного газа в качестве химического ресурса в настоящее время ограничено производством синтез-газа по технологии риформинга: паровой риформинг, частичное окисление, сухой риформинг и их сочетание. Метан является основной составляющей природного газа и пиролиз метана (конверсия без добавления кислородсодержащих соединений) является наиболее привлекательным процессом риформинга природного газа, в котором можно синтезировать соединения с более высокой молекулярной массой. Тем не менее высокая потребность в энергии из-за высоких температур пиролиза (> 1100 ° C) и недостатки, связанные с пиролитическими печами, такие как длительные периоды включения/выключения и большие объемы выброса газа рассматриваются как важные ограничения процесса. Основная трудность прямого преобразования метана - активация стабильной связи C–H. Обычные методы, использующие высокую температуру и благородный катализатор, требуют большого количества энергии и недостаточно избирательны. Низкотемпературная плазма атмосферного давления может иметь здесь явное

преимущество. При низких температурах электрический разряд порождает активные центры - свободные радикалы, ионы или возбужденные молекулы, которые могут инициировать цепные процессы крекинга углеводородов. Высокие плотности энергия разряда (микроволновые, дуговой, искровой и коронный разряды) позволяют достичь 70-90% конверсии CH_4 при подводимой энергии единицы-десятки эВ/молекулу. Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) в отличие от других типов разряда может работать при повышенных (0,1–10 бар) давлениях при температуре окружающей среды. В настоящее время проводится много исследований по использованию ДБР для конверсии парниковых газов, CH_4 и CO_2 в высшие углеводороды, оксигенаты и синтез-газ. Однако есть еще ряд вопросов, открытых для обсуждения. В частности, еще много исследовательской работы должно быть выполнено в отношении энергоэффективности плазмохимической конверсии, чтобы прийти к устойчивому промышленному процессу. Большую ценность в понимании плазмохимических процессов дает моделирование газоразрядных явлений. Результаты моделирования по физике и химии газовой фазы в различные виды метаносодержащих выбросов широко исследовалась в течение последних тридцати лет. Однако меньшая часть из них касается моделирования плазмы реакторов конверсии газа. До сих пор эти исследования в основном касались нульмерного моделирования и в значительной степени основаны на эмпирических данных для конкретных экспериментальных установок. Таким образом, исследования, направленные на выяснение основных механизмов конверсии природного газа с учетом плазмохимического воздействия, представляются весьма актуальными для широкого спектра приложений.

В исследовании Маланичева В. Е. рассматривается процесс воздействия барьерного разряда на компоненты природного газа (метан, этан и пропан). С помощь созданной установки, включающей четыре типа плазмохимических реакторов проведен ряд экспериментов, в ходе которых оценивалась степень неоднородности разряда, удельный энерговклад и концентрация различных химических соединений на выходе их реактора. Проведено численное моделирование процесса развития барьерного разряда. Все эти исследования были направлены на детализацию и уточнение процесса, который возможно использовать для усовершенствования преобразования метана в более сложные углеводороды или синтез-газ. Таким образом, тема диссертационной работы **является актуальной**, так как в диссертации рассматривается задача, направленная на решение проблемы эффективного использования природного газа, а рациональное использование природных ресурсов является одним из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий в РФ.

Научная новизна

В диссертационной работе получены **новые результаты**, а именно впервые исследовано комбинированное двухэтапное воздействие на природный газ с целью получения синтез-газа. Первый этап включал в себя обработку исходного газа ДБР, второй – парциальное окисление кислородом

воздуха. Эксперименты показали, что воздействие разряда увеличивает выхода синтез-газа на 15 и более %.

В отличии от большинства экспериментальных работ автором, при формировании ДБР, использовался твердотельный коммутатор оригинальной конструкции на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором позволяющий создать времена нарастания до 100 нс при амплитуде до 16 кВ и частоте до 4 кГц.

Задачи, решенные в диссертации

1. разработана и создана электрофизическая установка с регулируемыми параметрами, включающая в себя плазмохимические реакторы с различной конфигурацией газоразрядной ячейки, которая позволила исследовать воздействие барьерного разряда на основные компоненты природного газа при атмосферном давлении;
2. экспериментально исследованы основные характеристики барьерного разряда атмосферного давления и проанализирован состав выходной смеси при различных геометрических конфигурациях разрядного промежутка в широком диапазоне электрофизических параметров (напряженности электрического поля, энерговклада в плазму, частоты повторения и скорости нарастания импульсов напряжения);
3. проведено численное моделирование процессов, протекающих при развитии газового разряда с диэлектрическим барьером и оценены концентрация, энергия электронов и ионов, напряженность электрического поля и энерговклад в плазме;
4. на основании полученных экспериментальных данных и данных численного моделирования оценено влияние электрофизических параметров на процесс воздействия барьерного разряда на основные компоненты природного газа при атмосферном давлении.

Оформление диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 113 страниц, 55 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 122 источника.

Во **введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем, сформулированы научная новизна полученных результатов и практическая значимость представляемой работы, отмечен личный вклад автора в получении результатов исследований, связанных с темой, и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов в области изучения процесса воздействия разрядов различных типов на природный газ и метан.

Во **второй главе** представлено описание и характеристики созданной электрофизической установки и плазмохимических реакторов с различной конфигурацией газоразрядной ячейки, приведены технические характеристики системы подачи газа, системы электропитания, системы анализа химического состава газа, системы диагностики электрофизических параметров.

В **третьей главе** подробно описаны эксперименты направленные на исследование влияния внешних параметров на режим горения барьерного разряда. Получена зависимости степени неоднородности барьерного разряда от скорости движения газа в разрядном промежутке.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса воздействия барьерного разряда с природным газом. Произведен расчет параметров плазмы при развитии барьерного разряда для математической модели в случае 0-мерного приближения (с использованием программного пакета «ZDPlaskin»), и 1-мерного приближения. Проведен ряд экспериментов, в ходе которых получены зависимости конверсии и выхода рассматриваемых химических элементов от энерговклада в разряд.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные автором в рамках данной работы:

Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в систематическое экспериментальное изучение барьерного разряда применительно к обработке газового объема. Результаты численных расчетов возможно применить для инженерных расчетов плазмохимических установок. Разработанная и созданная автором работы электрофизическая установка может применятся для дальнейших исследований плазмохимических процессов в углеводородах, а также в других газовых средах.

Степень **достоверности** полученных результатов и **обоснованность научных положений,** выносимых на защиту, обеспечивается использованием современной аппаратуры и методов исследований, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, использованием современных программных пакетов моделирования электрофизических процессов, а также сравнением результатов исследований с результатами, полученными другими авторами как в России, так и за рубежом.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 12 международных конференциях.

Вклад автора

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в разработке и создании электрофизической установки, а также в экспериментальном исследовании процесса воздействия барьерного разряда на природный газ. Им было проведено численное моделирование процесса развития разряда в случае 0-мерного и 1-мерного приближения

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Замечания и вопросы по работе:

1. На стр.35-39 автором оцениваются величины напряженности приведенного электрического поля для различных типов реакторов в диапазоне 300-500 Td. Учитывалось ли в этих оценках влияние диэлектрика?
2. На стр.53-54 делается вывод о времени релаксации следов объемного заряда 10 мс и далее «...В реальной системе проводимость объемных следов начинает снижаться значительно раньше». Так каково же это снижение?
3. Стр.70. Как следует понимать фразу «...Электроны и ионы рекомбинируют в большей мере на стенке из-за случайного движения и в следствии потенциального выравнивая»?
4. Известно, что в ряде случаев разрядов в углеводородных газах имеют место процессы возбуждения и рекомбинации, типа $e+C_xH_y= e+C_xH_y^*$ или $e+C_xH_y^+=$ нейтральные продукты. Почему среди возможных реакций (стр.72) эти процессы не учитывались? Хотя на стр.91 об этом упоминается.
5. Имеются стилистические замечания и некоторая небрежность в оформлении рис. 2.2 –не подписаны позиции 9 и 10, рис.3.1 –не даны масштабы напряжения и тока.

Заключение

Отмеченные замечания не уменьшают общую положительную оценку диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Маланичева Виктора Евгеньевича «Исследование воздействия барьерного разряда на основные компоненты природного газа при атмосферном давлении» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки». Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. В опубликованных автором работах отражены основные результаты и

положения диссертации. Диссертационная работа обладает научной и практической значимостью.

Оформление диссертации, публикации и апробация работы соответствуют «Положению о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а автор диссертационной работы Маланичев Виктор Евгеньевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент:
Профессор высшей школы высковольтной энергетики, института энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ,
доктор технических наук, доцент Емельянов Олег Анатольевич

«28» декабря 2020 г

Почтовый адрес:

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Эл. почта: oaemel2@gmail.com

Подпись Емельянова Олега Анатольевича заверяю.

Сведения об официальном оппоненте

Фамилия имя отчество	Емельянов Олег Анатольевич
Ученая степень	Доктор технических наук
Научная специальность	01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»
Место работы и должность	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ), Институт энергетики, Высшая школа высоковольтной энергетики, профессор
Адрес	195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта	oaemel2@gmail.com

Список публикаций Емельянова О. А. по теме диссертации за последние 5 лет:

1. Feklistov E. G., Emelyanov O. A., Optimization of Cold Atmospheric Plasma Generator Electrode System // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical And Electronic Engineering, Elconrus 2019
2. Емельянов О. А., Петрова Н. О., Смирнова Н. В., Шемет М. В., Разработка и применение устройства генерации холодной плазмы атмосферного давления для лечения повреждений кожи и мягких тканей животных // Письма в журнал технической физики, 2017, Т. 43, № 16, С. 30
3. Емельянов О. А., Плотников А. П. Определение зависимости ёмкости сегнетокерамических конденсаторов от напряжения методом импульсного разряда // Измерительная техника, 2017, № 9, С. 44
4. Смирнова Н. В., Петрова Н. О., Емельянов О. А. Применение генератора холодной плазмы атмосферного давления для аппаратного лечения повреждённой кожи и мягких тканей крупных домашних животных // Иппология и ветеринария, 2017, №3 (25), С. 36.
5. Emelyanov O., Kliuiko P., Shemet M. Single Partial Discharge in Nonuniform Electric Field for Different Polymer Dielectrics // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, ICD 2016. 1. 2016. P. 1171-1174
6. Emelyanov O., Shemet M. Dielectric Barrier Discharge in Needle-To-Plane Configuration: Model of Surface Charge Relaxation // Journal of Electrostatics, 2016, T. 81, P. 71

7. Emelyanov O.A., Shemet M. V. Study of the Mechanisms of Barrier Discharge Development in the Needle–Plane System // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2016, V. 52, № 6, P 579.
8. Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P. Numerical Simulation of Electro-Thermal Processes in Multilayer Ceramic Capacitors // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. P. 78-80.
9. O. A. Emelyanov, E. G. Feklistov, N. V. Smirnova et al. Corona discharge plasma application for in vitro modulation of fibroblast proliferation and wound healing // AIP Conference Proceedings 2179, 020006 (2019)
10. O. A. Emelyanov, A. P. Plotnikov Ferroelectric capacitors under extreme load conditions // AIP Conference Proceedings 2308, 040001 (2020)
11. O. A. Emel'yanov, I. O. Ivanov Frequency Dispersion of the Impedance of Capacitor Structures with Asymmetrically Connected Electrodes // Technical Physics volume 63, pages111–115(2018)
12. V. Belko, D. Glivenko, O. Emelyanov, I. Ivanov and A. Plotnikov, Current Pulse Polarity Effect on Metallized Film Capacitors Failure, // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 6, pp. 1020-1025, June 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2703947.

Официальный оппонент:

Профессор высшей школы высковольтной энергетики, института энергетики, ФГАОУ ВО СПбПУ,
доктор технических наук, доцент

Емельянов Олег Анатольевич

«28» декабря 2020 г

Сведения об официальном оппоненте верны.
Подпись Емельянова Олега Анатольевича заверяю.