

СИНТЕЗ ОКИСЛОВ АЗОТА В ПОДПОРОГОВОМ МИКРОВОЛНОВОМ
РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ И В ЕГО СМЕСИ С МЕТАНОМ

© 2020 г. К. В. Артемьев^а, Г. М. Батанов^а, Н. К. Бережецкая^а, В. Д. Борзосеков^а,
С. И. Грицинин^а, А. М. Давыдов^а, Л. В. Колик^а, Е. М. Кончечков^а, И. А. Коссий^{а, *},
Ю. А. Лебедев^б, И. В. Моряков^а, А. Е. Петров^а, К. А. Сарксян^а,
В. Д. Степахин^а, Н. К. Харчев^а, В. А. Шахатов^б

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^б Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

*e-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.

После доработки 02.10.2019 г.

Принята к публикации 04.10.2019 г.

Подпороговый разряд, возбуждаемый пучком микроволнового излучения в воздухе при давлении, близком к атмосферному, исследован как плазмохимический способ наработки окислов азота NO_x . Показано, что при энергетических затратах на уровне $(2-4) \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ возможно получение концентрации окислов азота в “чистом” воздухе, на несколько порядков превышающей концентрацию в исходной воздушной среде. Вместе с тем продемонстрирована возможность практически полностью исключить образование окислов азота при вводе в облучаемый воздух примеси метана (CH_4), что существенно повышает перспективы использования самоподдерживающегося несамостоятельного разряда для очистки газовых выбросов городских мусорных полигонов от содержащихся в них экологически вредных примесей (сероводород, меркаптан и др.).

Ключевые слова: самоподдерживающийся несамостоятельный СНС-разряд, плазмохимия, экология

DOI: 10.31857/S0367292120030014

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленный арсенал различного рода электроразрядных источников плазмы в последние годы пополнился обнаруженным и исследованным в ИОФ РАН новым типом плазменных генераторов, базирующихся на так называемом самоподдерживающемся несамостоятельном СНС-разряде, возбуждаемом пучками микроволн [1–4]. СНС-разряд формируется в условиях, выглядящих на первый взгляд парадоксальными, а именно, при приведенных электрических полях в пучках $E/n_0 \ll [E/n_0]_{thr}$, где E – микроволновое электрическое поле, n_0 – концентрация нейтралов в газовой среде, а $[E/n_0]_{thr}$ – пороговое для возбуждения самостоятельного микроволнового разряда приведенное электрическое поле.

В основе разработанной в ИОФ РАН физической модели формирования СНС-разряда [1] лежит явление ионизационно-перегревной неустойчивости несамостоятельного микроволнового разряда, обладающего спецификой, отличающей его от всех известных разрядных разновидностей. Особенность разряда заключается в том (как показано в [5]), что при достижении не-

линейной стадии ионизационно-перегревной неустойчивости в разрядном объеме возникает множество локальных областей, представляющих собой вытянутые вдоль электрического поля E тонкие плазменные “нити”, обладающие чрезвычайно высокими величинами концентрации электронов ($n_e \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и температурой ($T_g \approx 4000 - 7000 \text{ К}$) с рекордно большим удельным энергоскладом (до $1 \text{ кДж}/\text{см}^3$). Быстрый нагрев до сверхвысоких температур, сопровождающийся быстрым же охлаждением, связанным с расширением разрядных “нитей”, позволяет рассматривать характерные для неустойчивости неоднородности как специфической природы “микровзрывы”.

Проведенные эксперименты показали, что для формирования разрядного столба в микроволновом пучке необходимо в одном из его сечений тем или иным способом возбудить несамостоятельный разряд так, чтобы за времена, много меньшие длительности микроволнового импульса, он достиг нелинейной стадии со сверхплотными и сильно перегретыми неоднородностями. В таком случае от занимающего чрезвычайно малый объем микроволнового пучка места инициации на-

встречу микроволновому излучению начинает распространяться волна ионизации, представляющая собой СНС-разряд с последовательным формированием на фронте множества плазменных “микровзрывов” [6, 7]. В серии работ ИОФ РАН, посвященных исследованию СНС [1, 4, 6–9], проведена регистрация оптического излучения разряда при помощи спектрографов AVASPEC 2048, AVASPEC 3648 и HR 2000. Наиболее информативным с точки зрения определения температуры газа в областях “микровзрывов” оказался спектр, полученный с помощью HR 2000, работающего в диапазоне длин волн 300–4000 нм. В этом диапазоне лежит излучение второй положительной системы азота. Температура газа, определенная методикой, описанной в [10, 11], оказывается столь высокой, как $T_g \approx 4000$ – 7000 К, что согласуется с предсказаниями физической модели, основанной на определяющей роли в формировании СНС-разряда ионизационно-перегревной неустойчивости, достигающей сильно нелинейной стадии.

При работе с реальными воздушными смесями (в том числе образцами выбросов городских мусорных свалок) в спектре оптического излучения регистрировалась линия водорода H_α . В предположении, что штарковский механизм ответственен за уширение линии, получена величина концентрации электронов в областях “микровзрывов”, превышающая $n_e \geq 10^{16}$ см $^{-3}$.

СНС-разряд, представляющий несомненный интерес как необычное электроразрядное явление, может оказаться полезным для целого ряда приложений, к числу которых следует отнести его плазмохимическое использование. Именно этой области приложений посвящен цикл экспериментов, результаты которых предполагается описать и обсудить в ряде статей, начиная с настоящей, в которой основной проблемой является проблема возбуждения СНС-разряда в воздушной среде и сопровождающей его наработки окислов азота.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Поиск возможности реализовать сильно подпороговый СНС-разряд в больших газовых объемах при давлениях порядка или больше атмосферного привел к созданию в ИОФ РАН установки ФАКЕЛ [4]. В основе установки лежит гиротронный комплекс MIG-3 GYROTRON, генерирующий микроволновый пучок со следующими параметрами: мощность микроволнового импульса $P_i \leq 600$ кВт, длительность импульса $\tau_{mv} \leq 20$ мс, длина волны $\lambda = 0.4$ см. Квазиоптическая система формирует микроволновый пучок, распространяющийся от выходного окна гиротрона к входному окну в камеру реактора, в ко-

тором возбуждается СНС-разряд. Распределение электрического поля в поперечном сечении микроволнового пучка близко к гауссовому. Даже при максимальных мощностях микроволнового импульса значение приведенного электрического поля во всем пучке не превышает $\gamma = E/n_0 \leq 10^{-16}$ В · см 2 , что ниже порога генерации самостоятельного разряда в воздухе в свободном пространстве $\gamma \geq 10^{-15}$ В · см 2 [12].

На установке ФАКЕЛ исследовался СНС-разряд в свободном пространстве в воздухе при атмосферном давлении, а также при столь же высоком давлении в замкнутой камере. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Здесь за инициатором *б*, создающим тонкий слой с несамостоятельным микроволновым разрядом, располагается поглощающая микроволновое излучение нагрузка *11*. Элементы *б* и *11* – по сути дела единственные приспособления, обеспечивающие генерацию именно СНС-разряда.

Цилиндрическая камера *12* объемом в 7 л выполняется как из диэлектрика, так и из металла. Поперечные размеры ее должны превышать поперечный размер микроволнового пучка. Один из торцов – обращенный к микроволновому излучателю – закрыт радиопрозрачным окном *4*, предназначенным для ввода микроволнового пучка. Инициатор *б* и поглотитель микроволн *11* располагаются у противоположного конца цилиндра. В камере предусмотрена возможность откачки и заполнения воздухом, а также вывод газа, обработанного СНС-разрядом.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Круг проблем, приложение к которым СНС-разряда может оказаться полезным, весьма широк. К нему, в частности, относится проблема использования микроволнового подпорогового газоразрядного явления в интересах современной плазмохимии. При этом имеется в виду ввод в исследуемые плазмохимические процессы нового направления – химии газовой среды с распределенными в ней микроволновыми микровзрывными плазменными образованиями.

Уже первые эксперименты, связанные с СНС-разрядом как средством очистки городской воздушной среды от загрязнений, вызванных газовыми выбросами автотранспорта, а также с загрязнениями, источником которых являются промышленные предприятия [13–15], позволяют отметить ряд особенностей, безусловно привлекающих для городской экологии, а именно:

– возможность, использовать современную микроволновую технику, возбуждения разряда в воздухе и в большом числе других газов и газовых смесей атмосферного (и выше) давления без при-

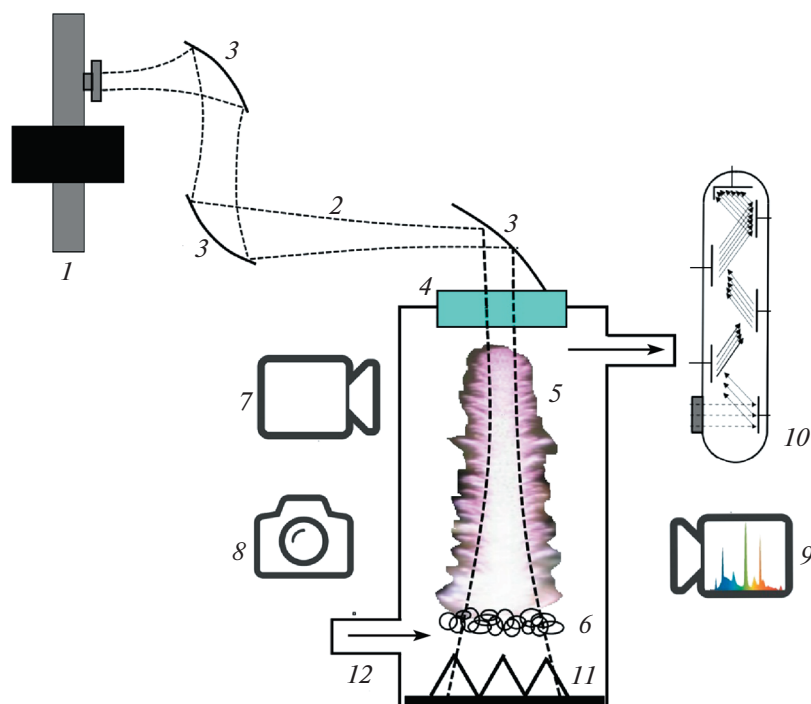


Рис. 1. Экспериментальная установка ФАКЕЛ, предназначенная для исследования СНС-разряда. 1 – гиротронный комплекс МИГ-3, 2 – микроволновый пучок, 3 – отражающее микроволны зеркало, 4 – прозрачное для микроволнового излучения окно, 5 – СНС-разряд, 6 – инициатор СНС-разряда, 7 – высокоскоростная видеокамера, 8 – электронно-оптическая камера ФЭР-7, 9 – оптический спектрометр, 10 – ФЭУ, 11 – поглотитель микроволн, 12 – цилиндрическая камера.

влечения откачки в замкнутых камерах и в свободном пространстве;

– одновременное деструктивное воздействие на практически все экологически вредные примеси в воздушной среде без сколько-нибудь заметной роли обратных (восстанавливающих исходную молекулу) процессов.

Однако, вместе с этими и рядом других свойств, делающих СНС-разряды привлекательными с точки зрения экологии, следует иметь в виду и потенциальные их недостатки. Особенно если, как в настоящей работе, основной интерес к ним определяется проблемами улучшения экологического качества воздушной среды в современном мегаполисе. К этим потенциальным недостаткам необходимо отнести вероятность наработки значительного количества окислов азота, отрицательно действующих на городского жителя.

Сужая область исследований проблемой ликвидации загрязнения городской воздушной среды газовыми выбросами действующих или ликвидируемых городских мусорных свалок, – мы провели цикл экспериментов на стенде ФАКЕЛ с “чистым” воздухом, воздухом с внесенной в него примесью метана, а также с образцами воздуха, отобранными на реальном свалочном полигоне и доставленными в ИОФ РАН.

На рис. 2 приведены результаты измерений наработки NO в камере установки ФАКЕЛ по схеме рис. 1. Камера реактора откачивалась до давления порядка 10^{-1} мм рт. ст. с последующим заполнением воздухом из лабораторного помещения при давлении, близком к атмосферному ($p \cong 749$ мм рт.ст). В камеру вводился пучок микроволнового излучения в режиме одиночных импульсов мощностью $P_i = 200$ кВт и длительностью $\tau_{mw} = 1.5$ мс. Содержание NO в см^3 (n_{NO} в ppm) регистрировалось мультигазовым анализатором MRU Option-7. На рис. 2 показана зависимость n_{NO} от удельной энергии ϵ , вложенной в заполняющий камеру газ,

$$\epsilon \cong N_i P_i \tau_{mw} / V_r \text{ (Дж/см}^3\text{)},$$

где N_i – число микроволновых импульсов, облучивших газ в камере, P_i – мощность импульса, τ_{mw} – длительность микроволнового импульса, V_r – объем газа, заполняющего камеру реактора.

Получение каждой точки на кривой $n_{NO}(\epsilon)$ проводилось с предварительной откачкой обработанного ранее газа и заполнением камеры “свежим” воздухом. Содержание NO определялось непосредственно в камере реактора в течение нескольких секунд после окончания обработки воздушной мишени.

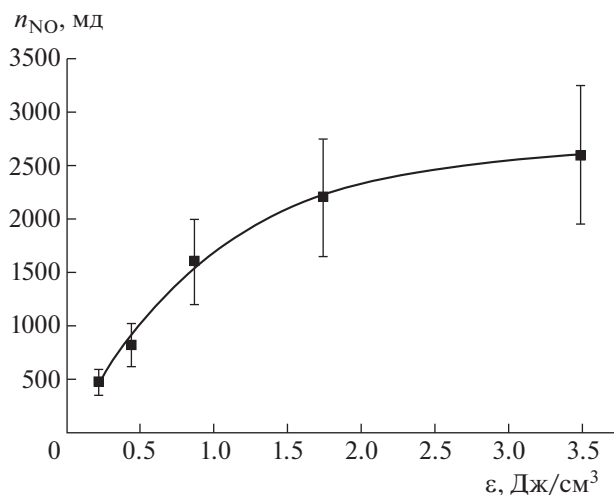


Рис. 2. Зависимость наработки NO в воздухе в камере установки ФАКЕЛ СНС-разрядом, возбуждаемым микроволновым пучком от ϵ . $p = 749$ мм рт. ст., $P = 200$ кВт, $\tau = 1.5$ мс.

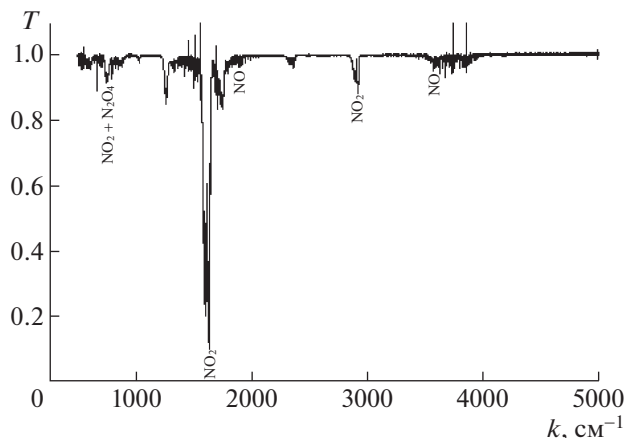


Рис. 3. Типичный спектр оптического поглощения воздуха, обработанного СНС-разрядом.

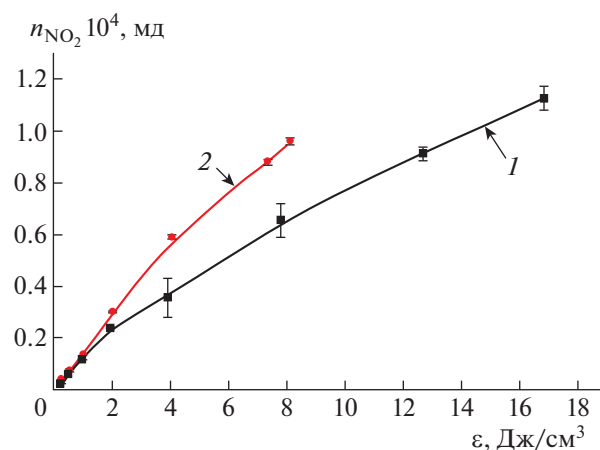


Рис. 4. Зависимость концентрации NO₂ от удельного энерговклада ϵ в СНС-разряд: 1 – при $P = 150$ кВт, 2 – при $P = 300$ кВт.

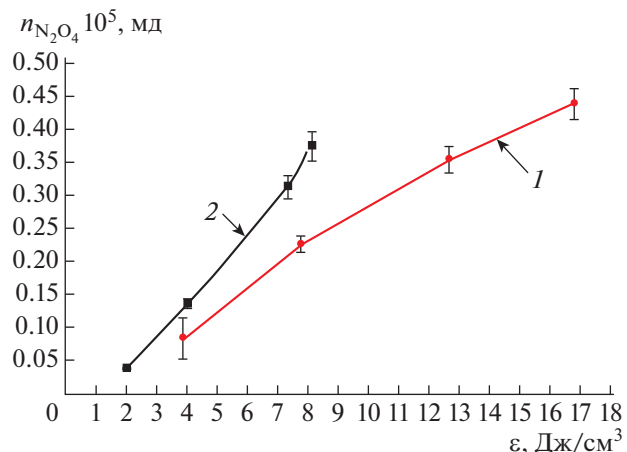


Рис. 5. Зависимость концентрации N₂O₄ от удельной энергии ϵ , вложенной в СНС-разряд: 1 – при $P = 150$ кВт, 2 – при $P = 300$ кВт.

Для получения данных об установившемся составе послеразрядного объема воздуха, подвергнувшегося облучению СНС-разрядами в камере реактора, поставлены эксперименты с использованием в качестве анализатора инфракрасного фурье-спектрометра ФСМ 2202. Режим облучения объема: счетное число импульсов микроволнового излучения с длиной волны $\lambda = 0.4$ см и мощностью 150 или 300 кВт. Длительность импульсов подбиралась так, чтобы фронт микроволнового разряда, возбуждаемого вблизи инициатора, достигал к концу импульса торцевого фланца с радиопрозрачным окном. А именно, при мощности 150 кВт длительность импульса составляла ~ 3.5 мс, при 300 кВт была ~ 0.7 мс. Измерения состава облученного воздушного объема проводи-

лись на фурье-спектрометре в отобранных из реактора объемах воздуха через 20–30 минут после окончания облучения. Характерный спектр, полученный на спектрометре, показан на рис. 3. На спектре отмечены полосы окислов азота NO, NO₂, NO₂ + N₂O₄, по которым определялась концентрация этих компонентов. Данные для калибровки полос взяты из данных, приводимых Pacific National Northwest Laboratory (PNNL).

Зависимости выраженных в миллионных долях мд (ppm) содержаний различных окислов азота (NO₂, N₂O₄) в обработанном микроволновым разрядом “чистом” воздухе от удельного энерговклада, представлены на рис. 4, 5. Как следует из проведенных измерений, при энергетических за-

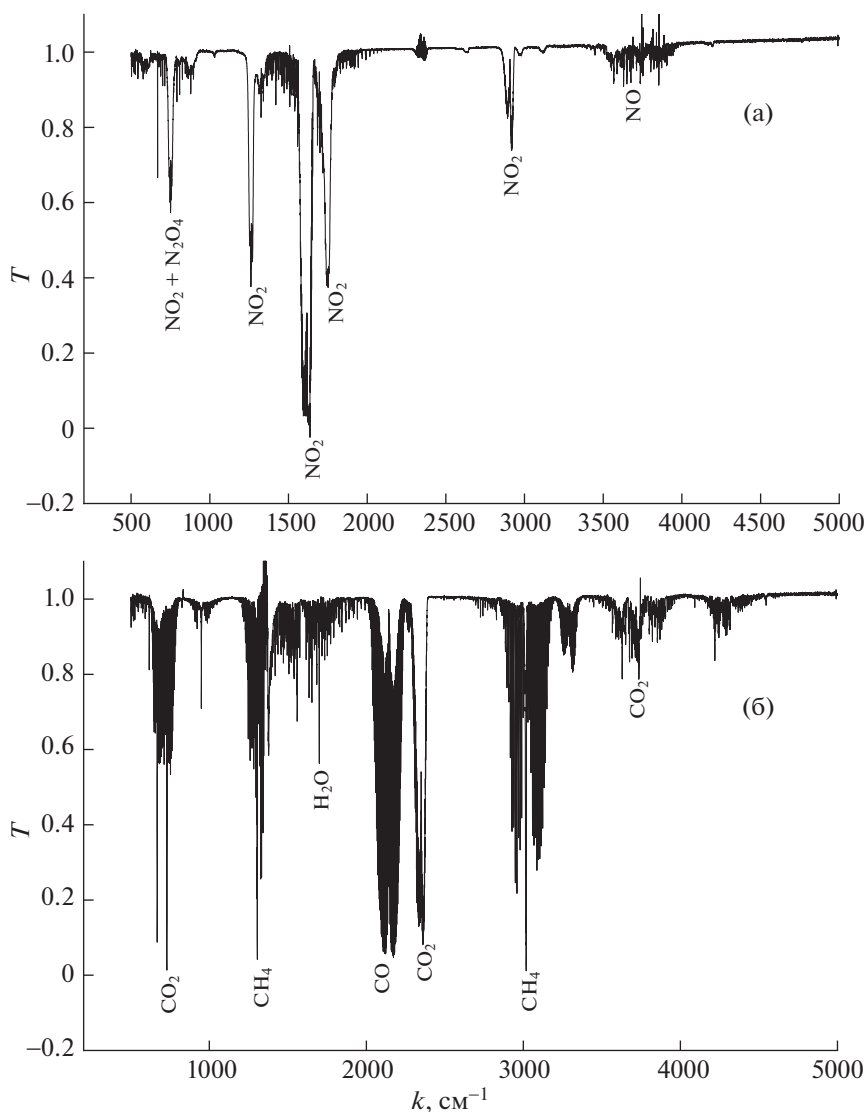


Рис. 6. Спектры пропускания оптического излучения в широком диапазоне длин волн, снятые после облучения “чистого” воздуха (а) и смеси воздуха с метаном (б) СНС-разрядом. Удельный энергоклад ~ 8 Дж/см³.

тратах на уровне $(2-4) \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ возможно получение концентрации окислов азота в “чистом” воздухе, на несколько порядков превосходящей концентрацию в исходной воздушной среде.

На рис. 6–8 приведены результаты исследования СНС-разрядов в “чистом” воздухе и в смеси воздух–метан. Мощность микроволнового импульса гиротрона $P_i = 150$ кВт, длительность импульса 3.8 мс. Регистрация состава газового образца осуществлялась на фурье-спектрометре ФСМ 2202.

На рис. 6 показаны спектры пропускания “чистого” воздушного образца (рис. 6а, $p = 740$ мм рт. ст.) и спектр образца воздушной и метановой смеси (рис. 6б, $p = 150$ мм рт. ст. CH_4 и 590 мм. рт. ст. воздух). Число микроволновых импульсов при получении спектров $N_i = 12$. Так как

объем микроволнового пучка меньше объема реактора, большое число импульсов необходимо для обработки всего газа, заполняющего реактор.

На рис. 7 и 8 приведены фрагменты спектра, представленного на рис. 6, отчетливо демонстрирующие обнаруженный в эксперименте эффект: отсутствие регистрируемого уровня содержания окислов азота при возбуждении СНС-разрядов в смеси кислород–азот–метан.

Не удалось зарегистрировать образование окислов азота и при обработке СНС-разрядом на стенде ФАКЕЛ газовых образцов, взятых на реальной мусорной свалке Москвы непосредственно перед вводом свалочного газа в действующую систему его очистки, предшествующую выбросу в городскую воздушную среду.

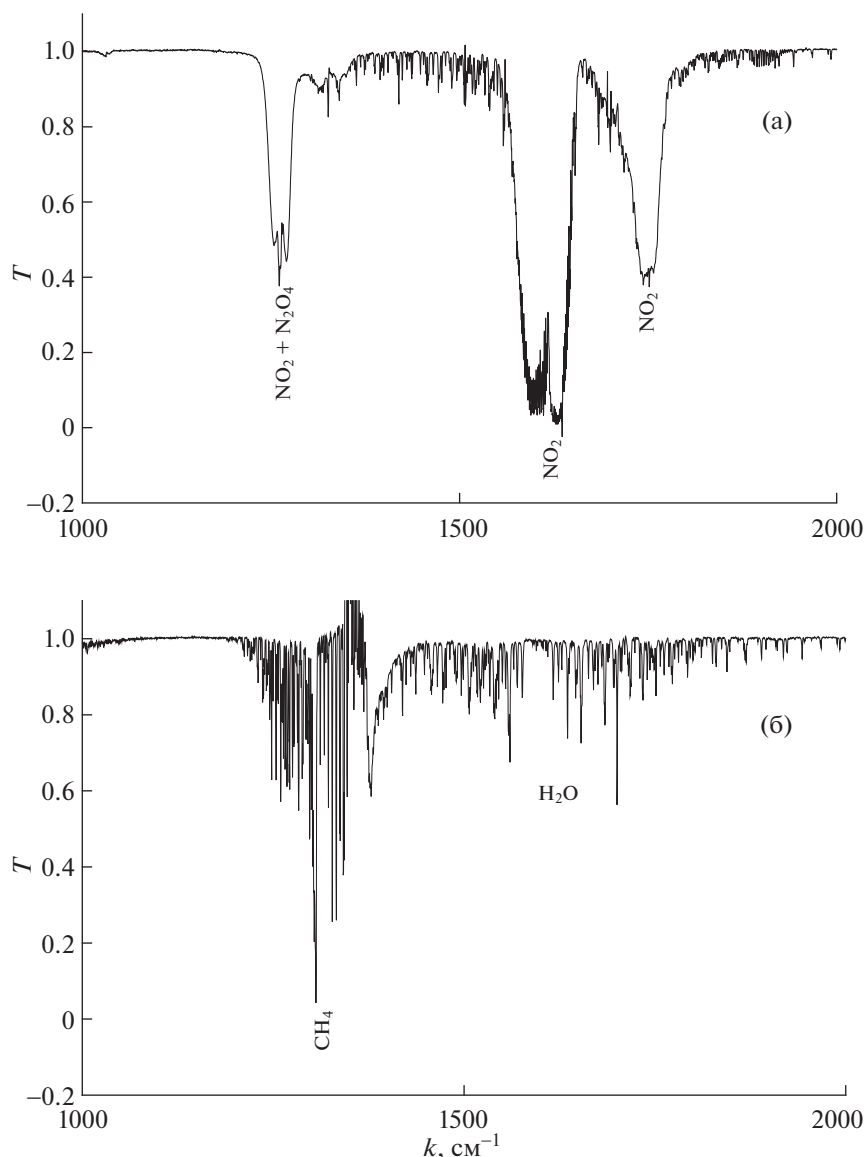


Рис. 7. Фрагменты спектра, представленного на рис. 6, демонстрирующие отсутствие наработки окислов азота при облучении смеси воздух–метан СНС-разрядом. а) – “чистый” воздух; б) – воздух с метаном.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Наработка окислов азота СНС-разрядами, возбуждаемыми в воздухе, является процессом, чрезвычайно важным для разрабатываемой системы очистки городской воздушной среды. Высокий уровень концентрации генерируемого разрядом избыточного количества NO_x может существенно понизить интерес к базирующейся на нем газоочистной системы из-за связанных с оксидами экологическими проблемами.

Среди всех окислов группы NO_x самым опасным для окружающей среды и человека является диоксид азота (NO_2). Класс опасности – второй. Это означает, что NO_2 относится к высокоопас-

ным веществам. Предельно допустимая максимально-разовая концентрация (ПДК) диоксида азота в воздухе населенных пунктов равна 0.085 мг/м^3 .

Первые же эксперименты, результаты которых приведены в настоящей статье, продемонстрировали тот факт, что разряд в “чистом” воздухе или в модельной кислород-азотной смеси приводит к генерации значительного количества окислов азота. Так после облучения воздуха атмосферного давления в реакторе установки ФАКЕЛ 80-ю микроволновыми импульсами, возбуждающими СНС-разряды при удельном энерговыделении порядка $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$, зарегистрировано образование NO в количестве 2600 ppm (при исходном, меньшем, чем 200 ppm).

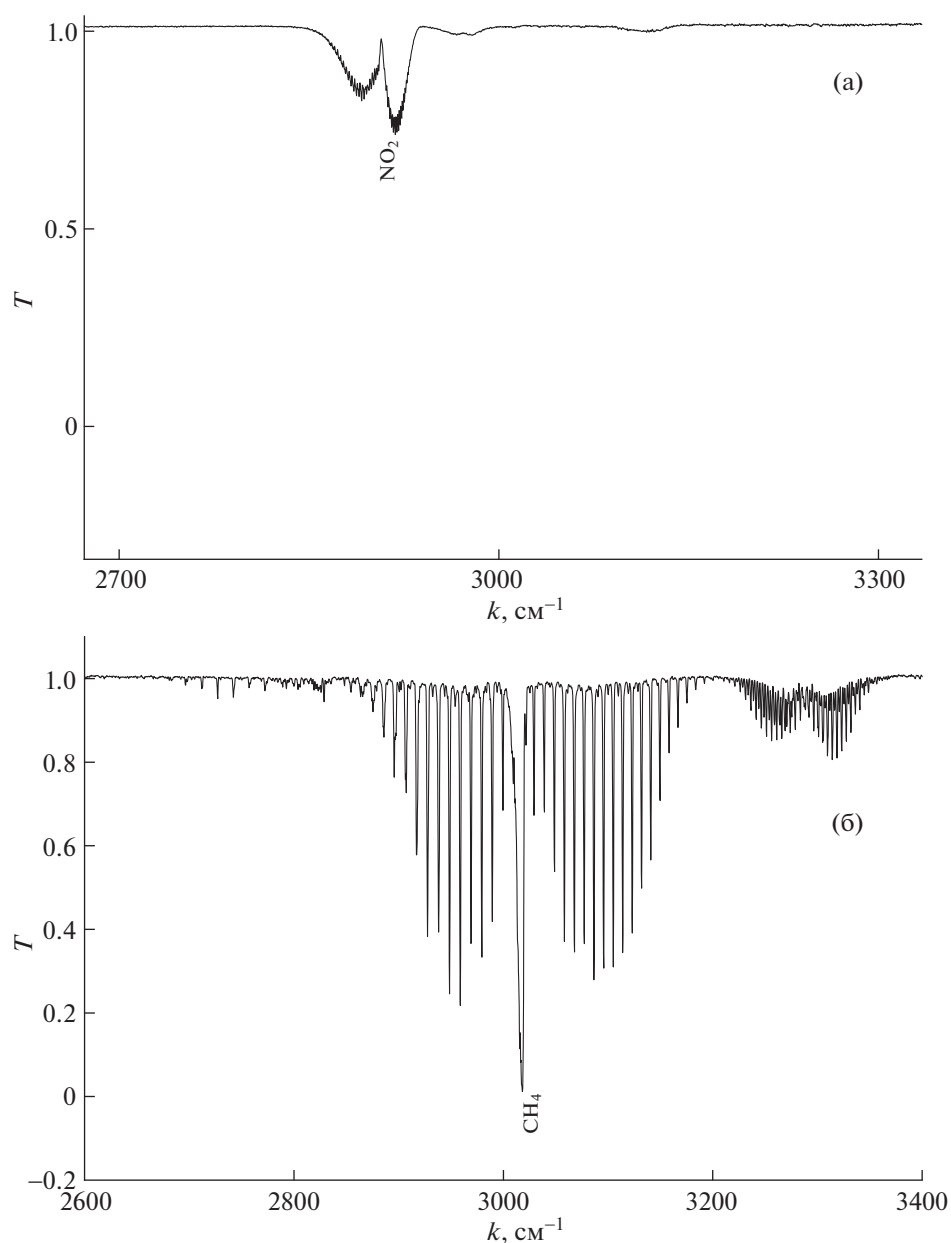


Рис. 8. То же, что на рис. 7, в другом диапазоне волновых чисел.

Один из основных выводов проведенных экспериментов заключается в необходимости анализа процессов наработки экологически вредных окислов азота в предполагаемых вариантах очистки городской атмосферы. Например, изображенные на рис. 9 и 10 и базирующиеся на использовании СНС-разряда, возбуждаемого непосредственно в выводящих выбросы трубах (рис. 9) или в очистных микроволновых реакторах перед поступлением в трубу (рис. 10) [15].

Необходимо в качестве важного следствия экспериментального исследования отметить результаты проведения на стенде ФАКЕЛ обработки СНС-разрядом модельной смеси: атмосфер-

ного давления воздух + CH_4 . Эксперименты показали, что наличие метана приводит к резкому снижению уровня наработки окислов азота до допустимых с точки зрения экологических требований величин.

Облучение микроволновым пучком воздушных образцов с забором их как до, так и после очистной системы на реальном мусорном полигоне также продемонстрировало отсутствие NO_x в обработанной СНС-разрядом газовой смеси.

При захоронении отходов на полигонах газовые выбросы в результате разложения органических веществ примерно на 50% состоят из метана.

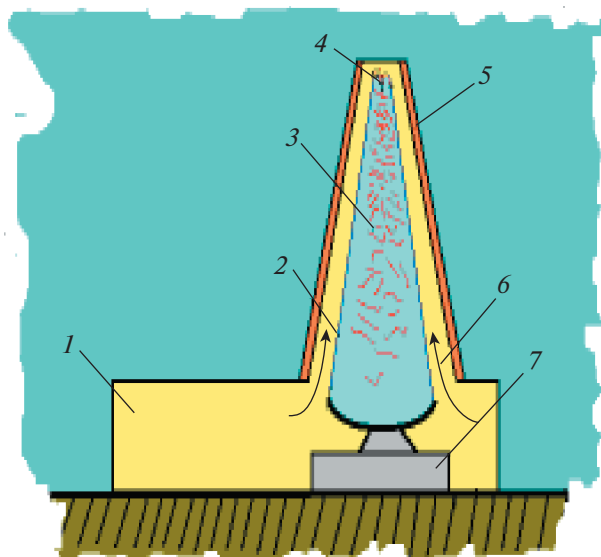


Рис. 9. Схема очистки промышленных газовых выбросов, базирующаяся на СНС-разряде, возбуждаемом непосредственно в выносящей загрязненные газы трубе. 1 – заводское здание, 2 – микроволновый пучок, 3 – СНС-разряд, 4 – инициатор разряда, 5 – газовая труба, 6 – поток очищаемого газа, 7 – гиротронный комплекс.

Примерно 50% составляет также содержание углекислого газа. Весьма небольшое содержание “неметанных” органических соединений. Муниципальные мусорные свалки являются третьим по величине источником выброса метана, связанного с деятельностью человека в США (в 2015 г. около 15% от полного поступления метана, вызванного деятельностью населения).

Исходя из такого рода сведений, результаты проведенных в настоящей работе исследований укрепляют надежды на целесообразность базирующейся на СНС-разряде очистной системы в вариантах, представленных на рис. 9 и 10. Здесь СНС-разряд предполагается возбуждать либо непосредственно в трубах, через которые осуществляется выброс свалочного газа (рис. 9), либо в располагаемых перед трубами газоразрядных реакторах (рис. 10).

Однако проблема состава подвергшихся обработке СНС-разрядом газовых выбросов городских мусорных свалок требует дальнейшего экспериментального исследования. В частности, установления значимости вызываемой разрядом наработки двуокси углерода сравнительно с ее содержанием в начальном составе выводимых из очистных систем газов.

Для построения концепции микроволнового высокопроизводительного воздухоочистительного устройства в ИОФ РАН начаты разработки компьютерной модели, описывающей наработку окислов азота плазмохимическим реактором, основанном на “микровзрывных” процессах ионизационно-перегревных неустойчивостей, развивающихся в СНС-разрядах в “чистом” воздухе и в смеси воздух-метан. На базе компьютерной модели предполагается осуществить программу поиска режимов, приводящих к существенному уменьшению производства окислов азота и в силу этого являющихся экологически безопасными.

Предварительный вывод, который может быть сделан, основываясь на результатах эксперимента и расчетов в рамках компьютерной модели, аналогичной примененной к микроволновому

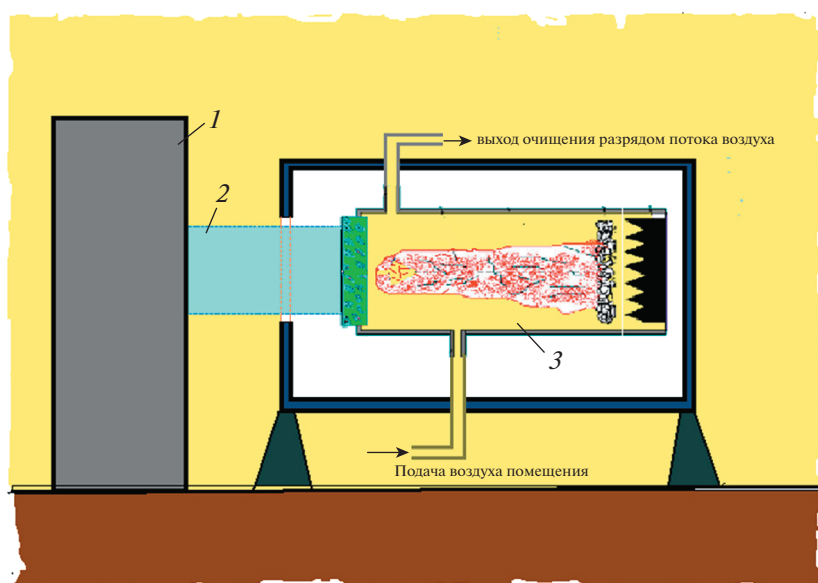


Рис. 10. Схема базирующегося на СНС-разряде реактора, очищающего загрязненные газовые выбросы перед поступлением их в трубу предприятия. 1 – гиротронный комплекс, 2 – микроволновый пучок, 3 – реактор на СНС-разряде.

факелу [16], заключается и в следующем. С точки зрения генерации окислов азота, СНС-разряд, также как микроволновый факел, может рассматриваться как система, в которой роль термодинамического равновесия оказывается пренебрежимой. И это несмотря на значительный отрыв электронной температуры в области “микровзрывов” от газовой. Для образования NO_x , по-видимому, определяющим является нагрев до 4000–7000 К с последующей закалкой. В настоящем эксперименте значения энергетических цен генерации окислов азота (~3–15 эВ/молек) оказались значительно меньше величин ≥ 100 эВ/молек, полученных в эксперименте (и предсказываемых теорией) с термодинамическими микроволновыми разрядами при относительно холодном воздухе (см., например, [17]).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведены исследования подпорогового микроволнового разряда, возбуждаемого гауссовым пучком в воздухе и смесях его с различного рода примесями высокого давления, как генератора окислов азота. Проведенные эксперименты подтвердили физическую модель, рассматривающую разряд как ионизационную волну, возбуждаемую микроволновым пучком, в виде множества характерных плазменных “микровзрывов”. В основе модели лежит специфика ионизационно-перегревной неустойчивости несамостоятельного микроволнового разряда, достигающей сильно нелинейной стадии.

Показано, что сопутствующая этой неустойчивости высокоэффективная наработка NO_x в “чистом” воздухе может быть сведена к чрезвычайно низкому уровню при вводе в воздух метана. Этот результат существенно повышает перспективность СНС-разрядов как возможной основы воздухоочистных систем на действующих и ликвидируемых городских мусорных полигонах. Роль метана может быть объяснена появлением атомарного водорода при разложении молекулы CH_4 в области микровзрывов и вступлением его в реакцию с кислородом с образованием молекул воды. При этом существенно может снижаться вероятность окисления азота с генерацией экологически опасных окислов.

Вместе с тем в отсутствие разрушающих окислов азота примесей СНС-разряд может рассматриваться и как эффективный источник NO_x , например, при производстве сельскохозяйственных удобрений.

Настоящая работа поддержана РНФ (проект № 17-12-01352).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P., Tarasova N.M.* Plasma Physics and Plasma Electronics / Ed. by L.M. Kovrizhnykh. Nova Science Publishers, Commack, 1985. P. 241.
2. *Kossyi I.A.* // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006. Report AIAA-1457.
3. *Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 2687.
4. *Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyun K.A., Kharchev N.K.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 907. 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012022>
5. *Ким А.В., Фрайман Г.М.* // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 613.
6. *Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Косый И.А., Неведов В.И., Сарксян К.А., Харчев Н.К.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. С. 429.
7. *Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков В.М., Косый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин Д.В., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 1011.
8. *Kossyi I.A., Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Sarksyun K.A., Kharchev N.K.* Microwave Discharges Fundamentals and Applications. Proceedings / Ed. by Yu.A. Lebedev. Moscow: Yanus-K, 2018. P. 171.
9. *Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосекоев В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 952–960.
10. *Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А., Косый И.А., Магунов А.Н.* // ТВТ. 2008. Т. 46 (1). С. 135.
11. *Магунов А.Н.* Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.
12. *Raizer Yu.P.* Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1991.
13. *Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Кончиков Е.М., Каторгин И.Н., Косый И.А., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Темчин С.М., Харчев Н.К.* // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 10.
14. *Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kharchev N.K., Kossyi I.A., Kozhevnikova N.A., Sarksyun K.A., Sysoev S.O., Temchin S.M.* // Proc. ESCAMPIG XXIV, Glasgow, Scotland, 2018. P. 10.
15. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Konchekov E.M., Katorgin I.N., Kossyi I.A., Sarksyun K.A., Stepakhin V.D., Temchin S.M.* // 7th Central European Symposium on Plasma Chemistry, Sveti Martin na Muri, Croatia, 2017. Book of Abstracts. P. 43.
16. *Грицинин С.И., Князев В.Ю., Косый И.А., Попов Н.А.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 1.
17. *Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Быков Д.Ф., Грицинин С.И., Косый И.А., Костинский А.Ю., Матвеев А.А., Силаков В.П.* // Труды Института общей физики. Т. 47. Физика и химия газовых разрядов в пучках СВЧ-волн. М., 1994. С. 9.