

Плазмохимическая очистка воздуха от городского загрязнения предпороговым разрядом, возбуждаемым пучками микроволн

Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, А. М. Давыдов, Е. М. Кончеков, И. Н. Каторгин,
И. А. Косский, К. А. Сарксян, В. Д. Степахин, С. М. Темчин, Н. К. Харчев

Приводятся первые результаты использования в качестве основы метода плазмохимической очистки городской воздушной среды от экологически опасных загрязнений подпорогового микроволнового разряда (самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) разряда), возбуждаемого пучком микроволн. Пучок микроволн создаётся гиротронным излучателем, генерирующим одиночные импульсы мощностью ≤ 600 кВт, длительностью ≤ 20 мс при длине волны 0,4 см. На двух образцах воздуха, изъятых из реальной атмосферы г. Москвы, в лабораторных экспериментах, проведённых в ИОФ РАН, продемонстрирована высокая эффективность одновременного снижения содержания характерных для современного большого города вредных веществ, поставляемых в атмосферу городским транспортом и промышленностью. Предлагаются различные варианты использования СНС-разрядов для решения задач обеспечения экологической чистоты воздушной среды мегаполисов.

Ключевые слова: плазмохимия, микроволновой разряд, самоподдерживающийся несамостоятельный (СНС) разряд.

Введение

Решение сложнейшей задачи поддержания высокого экологического качества жизни в современных мегаполисах, безусловно, было бы облегчено разработкой метода очистки городской атмосферы от значительного числа примесей, источ-

ником которых является городской транспорт, газовые выбросы промышленного производства, тепловых электростанций, утилизирующих мусор предприятий и т. д. Сложность проблемы состоит в существенных различиях по своему составу выбросов, в необходимости одновременного вывода из загрязняющих атмосферу поступлений целого ряда экологически опасных компонентов, в непредсказуемости места и времени действия ряда источников загрязнений и т. д. Всё перечисленное делает чрезвычайно затруднительной разработку универсальной технологии очистки городской воздушной среды. Отсутствие же в настоящее время в технике экологической защиты способа решения столь сложной и столь актуальной проблемы обуславливает интерес к обнаруженной и исследуемой в ИОФ РАН формы микроволнового разряда – **самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) разряда**, – возбуждаемого существенно подпороговыми микроволновыми пучками в газах высокого (вплоть до атмосферного и выше) давления [1–4].

Газовые разряды такого рода в воздушной среде (а также в среде практически любого газа и газовой смеси) представляют собой систему тонких (поперечный размер ≤ 100 мкм) плазменных каналов («нитей»), обладающих высокой концентрацией электронов ($n_e \approx 10^{16}–10^{17}$ см⁻³), чрезвычайно высокой газовой температурой ($T_g \approx 3000–7000$ К), высокой электронной температу-

Батанов Герман Михайлович¹, зав. лабораторией, профессор, д.ф.-м.н.

Бережецкая Наталья Константиновна¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Давыдов Алексей Михайлович¹, научный сотрудник.

Кончеков Евгений Михайлович¹, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Каторгин Илья Николаевич², специалист независимой экологической экспертизы.

Косский Игорь Анатольевич¹, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Сарксян Карен Агасевич¹, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Степахин Владимир Дмитриевич¹, младший научный сотрудник, к.т.н.

Темчин Савелий Мусиевич¹, научный сотрудник.

Харчев Николай Константинович¹, научный сотрудник.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119111, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: bereg@fpl.gpi.ru

² «Ecostandart group».

Россия, 105082, Москва, Переведеновский пер., 13/16.

Статья поступила в редакцию 10 августа 2017 г.

© Батанов Г. М., Бережецкая Н. К., Давыдов А. М.,
Кончеков Е. М., Каторгин И. Н., Косский И. А., Сарксян К. А.,
Степахин В. Д., Темчин С. М., Харчев Н. К., 2017

рой ($T_e \leq 5$ эВ) [5–7]. Столь специфическая и необычная разрядная структура обуславливает уникальные плазмохимические свойства [8–10], позволяющие рассчитывать на СНС-разряд как на основу метода решения отмеченной выше экологической задачи.

Целью данной работы является представление первых результатов обработки на экспериментальном стенде ИОФ РАН СНС-разрядом, возбуждаемым микроволновым пучком, образцов воздуха, взятых в г. Москве в одном из наиболее загрязнённых мест городских автотранспортных артерий, а также в расположенном в пределах Большой Москвы производстве. Представлены также физический и плазмохимический анализы результатов эксперимента, свидетельствующие о высокой эффективности новой формы микроволнового разряда в решении актуальных экологических задач современного мегаполиса.

Постановка эксперимента по обработке образцов городской атмосферы СНС-разрядом

Поиски возможности реализации микроволнового СНС-разряда в целях исследования его перспектив в качестве способа очистки загрязнённой городской атмосферы привели к созданию в ИОФ РАН установки «ФАКЕЛ», схема которой изображена на рис. 1. Установка базируется на гиротронном комплексе МИГ-3, используемом для создания и удержания высокотемпературной

плазмы на стеллараторе Л-2М [11, 12]. Комплекс включает в себя гиротрон «Борец» и квазиоптическую систему формирования микроволнового пучка, спроектированную и изготовленную в ИОФ РАН.

Параметры импульсного микроволнового излучения, генерируемого комплексом, следующие: мощность импульса $P_i \leq 600$ кВт, длительность импульса $\tau_{MW} \leq 20$ мс, длина волны $\lambda = 0,4$ см. Квазиоптическая система в экспериментах на стеллараторе формирует микроволновый пучок, распространяющийся в свободном пространстве от выходного окна гиротрона до входного окна в камеру стелларатора. Распределение электрического поля в поперечном сечении пучка близко к гауссовому.

При работе на установке «ФАКЕЛ» микроволновый пучок системой металлических зеркал отводился от стелларатора и (как показано на рис. 1) вводился в разрядную камеру (3) «ФАКЕЛА». Камера откачивалась до глубокого вакуума через патрубков (5) и через патрубок (4) заполнялась исследуемой газовой смесью при атмосферном давлении. Микроволновый пучок вводился в камеру через радиопрозрачное кварцевое окно (6) диаметром $\Phi \approx 6,0$ см, превосходящим диаметр микроволнового пучка. Толщина окна рассчитывалась и реализовывалась с размером, снижающим до пренебрежимо малых величин отражённую микроволновую мощность.

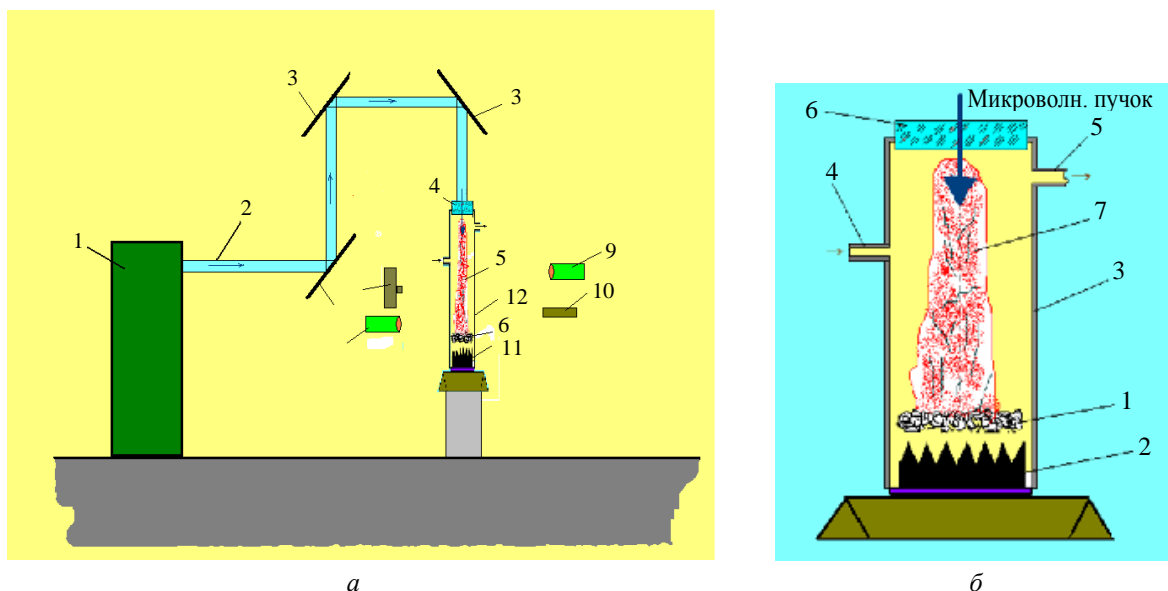


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, предназначенной для возбуждения СНС-разряда в закрытой цилиндрической камере с помощью подпорогового микроволнового пучка: а) 1 – гиротронный комплекс МИГ-3; 2 – микроволновый пучок; 3 – отражающие зеркала; 4 – радиопрозрачное окно; 5 – СНС-разряд; 6 – инициатор; 7 – скоростная видекамера; 8 – скоростной фоторегистратор FER-7; 9 – оптический спектрограф; 10 – фотумножитель; 11 – поглотитель микроволн; 12 – цилиндрическая камера; б) 1 – инициатор; 2 – поглотитель микроволн; 3 – цилиндрическая камера; 4 – напуск рабочего газа; 5 – выпуск отработанного газа; 6 – радиопрозрачное окно; 7 – СНС-разряд.

У противоположного входному окну фланца располагалась поглощающая микроволновое излучение нагрузка (2), перед которой устанавливался специально разработанный инициатор микроволнового разряда (1).

Ввод микроволнового пучка в разрядную камеру осуществлялся в одном из двух различных сечений, отстоящих от выходного окна гиротрона на 650 мм и 440 мм.

Внутренний диаметр камеры $\Phi_{\text{вн}} = 90$ мм, длина камеры $L_c = 20$ см.

Минимальное сечение пучка, соответствующее расстоянию $L_1 = 650$ мм, является эллиптическим с осями $a = 3$ см и $b = 1$ см. Площадь сечения $S_1 = \pi a b = 9,5$ см². На расстоянии $L_2 = 440$ см сечение имеет геометрию круга с радиусом 3 см и площадью $S_2 = \pi r^2 = 28$ см². Электрическое поле в пучке может быть рассчитано из соотношения:

$$E_{\text{max}} = 27,5(P/S)^{0,5} \text{ В/см}, \quad (1)$$

где P – микроволновая мощность в ваттах, а площадь поперечного сечения пучка S в см². В области минимального сечения при $P = 200$ кВт имеем $E_{\text{max}} = 3990$ В/см, тогда как в «круговом» сечении $E_{\text{max}} = 2300$ В/см.

Даже при максимальных мощностях микроволнового излучения т. н. *приведённое* электрическое поле в пучке не превосходит величину:

$$\gamma \equiv (E_{\text{max}} / n_0) = 10^{-16} \text{ В см}^2. \quad (2)$$

Заметим, что эта величина существенно меньше порога возбуждения самоподдерживающегося разряда: $\gamma_{\text{пор}} \approx 10^{-15}$ В см² [13].

Инициатор СНС-разряда, разработанный в целях проводимого эксперимента, отличается, в частности, отсутствием необходимости во внешнем энергетическом источнике (в отличие, например, от инициации лазерным пучком [14] или сильноточным поверхностным разрядом [15]), а также пренебрежимо малым отражением микроволнового излучения, способного нарушить работу гиротронного генератора.

Инициатор (см. фотографию на рис. 2) представляет собой «клубок» хаотически располагаемых тонких металлических нитей диаметром $\sim 0,5$ мм. Испытание этой конструкции в воздухе атмосферного давления продемонстрировало возможность возбуждения на ней микроволновым пучком тонкого слоя плазмы, генерируемой самоподдерживающимся разрядом. Механизм пробоя газовой среды определяется существованием в структуре инициатора хаотически расположенных

полуволновых зазоров, в которых микроволновое электрическое поле увеличивается до значений, превышающих порог самоподдерживающегося разряда. Добротность Q такого рода «микрорезонаторов» в структуре «клубка» должна представлять величину порядка и больше 100.



Рис. 2. Фотография инициатора подпорогового микроволнового СНС-разряда.

Иницированный «клубком» нитей тонкий слой газоразрядной плазмы даёт начало ионизационной волне, распространяющейся вдоль оси Z и уходящей от места инициации на расстояние тем большее, чем больше мощность микроволнового импульса P_i и его длительность τ_{MW} . Варьируя эти параметры, можно легко добиваться условий, при которых плазменный столб перекрывает весь аксиальный размер камеры. При этом возбуждаемый описанным образом разряд относится к категории СНС-разрядов со всеми присущими им особенностями, а именно, наличием структуры из тонких «нитей», представляющих собой области, характеризующиеся высоким удельным энерговыделением, большой концентрацией плазмы, высокими значениями газовой температуры и температуры электронов. Характерная фотография разряда в воздухе при мощности микроволнового пучка $P_i = 200$ кВт приведена на рис. 3.

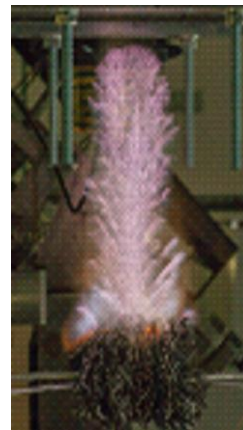


Рис. 3. Фотография СНС-разряда, возбуждаемого микроволновым пучком в свободном пространстве в воздухе атмосферного давления. $P_i = 200$ кВт; $\tau_{\text{MW}} = 6$ мс.

По схеме, представленной на рис. 1, проведены эксперименты, заключающиеся в определении эффективности микроволнового газоразрядного плазмохимического воздействия на городскую атмосферу в местах её наибольшего загрязнения, а также на газовые выбросы располагаемого в городских пределах производства.

Результаты эксперимента по обработке городской атмосферы СНС-разрядом

В качестве первого объекта исследований выбран Лефортовский автотоннель, находящийся на северо-востоке Москвы. Пятый по протяжённости в Европе (3,2 км), тоннель залегает на глубине 30 м под рекой Яуза и Лефортовским парком. Он снабжён системой освещения, водоудаления, замера уровня загазованности, системой дымоудаления. Системы, обеспечивающие функционирование, управляются в центральном диспетчерском пункте. Средняя интенсивность движения – 3,8 тысяч автомобилей в час. В часы пик – до 7–8 тысяч автомобилей в час.

Вторым исследованным объектом явилось малотоннажное лакокрасочное производство, расположенное в пределах Большой Москвы. Здесь образцы воздушной среды, характеризующие вы-

бросы во вне в городскую атмосферу, брались в рабочем помещении предприятия.

Образцы воздуха, взятые как в Лефортовском тоннеле, так и в лакокрасочном производстве, подвергались воздействию СНС-разряда, возбуждаемого мощным микроволновым пучком по схеме рис. 1. Исходный состав газовых образцов и состав после облучения определялись на стендах ООО «ЭКОСТАНДАРТ» путём активного отбора проб на сорбенте Tenax TA с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МСД/ПИД. Результаты анализа приведены в табл. 1–4.

В табл. 1 введены данные о составе исходного образца воздушного забора из Лефортовского тоннеля. В табл. 2 представлены результаты анализа воздушной пробы, подвергнутой воздействию по схеме рис. 1 СНС-разрядом в кварцевой камере объёмом 1300 см³. Использовались одиночные импульсы мощностью $P_i = 200$ кВт и длительностью $\tau_{MW} = 4$ мс. Полное число импульсов $N_i = 15$. СНС-разряд в одиночном импульсе занимает всю длину камеры. Плотность энерговыделения, суммарная по всем 15 импульсам и отнесённая ко всему газовому объёму реактора, составляет ~12 Дж/см³.

Таблица 1

Лефортовский тоннель. Исходный состав воздушной среды

№	Элемент	Содержание, мг/м ³	Содержание в ПДК
1	½ дихлорэтан ClCH ₂ -CH ₂ Cl	0,09100	0,03
2	Ацетальдегид CH ₃ CHO	0,075	7,5
3	Ацетон C ₃ H ₆ O	0,03300	0,09
4	Винилацетат CH ₃ CH(OH)CH ₃	0,06600	0,44
5	Изопропанол CH ₃ H ₈ O	0,13600	0,23
6	Ксилол (CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	0,5190	0,76
7	Стирол C ₃ H ₈	0,04600	1,15
8	Трихлорметан (Хлороформ) CHCl ₃	1,51000	15,0
9	Тетрахлорметан (Фреон 10) CCl ₄	0,00800	0,002
10	Фенол C ₆ H ₅ OH	0,00128	0,128
11	Формальдегид CH ₂ O	< 0,0100	< 1,00
12	Циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	0,00620	0,155
13	Этилбензол C ₆ H ₅ CH ₂ CH ₃	0,09530	4,76

Таблица 2

Лефортовский тоннель. Состав воздушного забора после обработки СНС-разрядом

№	Элемент	Содержание, мг/м ³	Содержание в ПДК
1	½ дихлорэтан ClCH ₂ -CH ₂ Cl	0,21450	0,07
2	Ацетальдегид CH ₃ CHO	0,0272	2,72
3	Ацетон C ₃ H ₆ O	0,09400	0,27
4	Винилацетат CH ₃ CH(OH)CH ₃	0,00845	0,056
5	Изопропанол CH ₃ H ₈ O	0,04405	0,191
6	Ксилол (CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	0,05965	0,298
7	Стирол C ₃ H ₈	0,01225	0,306
8	Трихлорметан (Хлороформ) CHCl ₃	0,27350	2,73
9	Тетрахлорметан (Фреон 10) CCl ₄	0,16400	0,041
10	Фенол C ₆ H ₅ OH	0,00102	0,102
11	Формальдегид CH ₂ O	< 0,0100	< 1,00
12	Циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	0,00400	0,100
13	Этилбензол C ₆ H ₅ CH ₂ CH ₃	0,02000	1.00

В табл. 3 сведены данные о составе исходного образца воздушного забора из помещения в

рабочей зоне малотоннажного лакокрасочного завода.

Таблица 3

Лакокрасочное производство. Исходный состав воздушного забора из помещения в рабочей зоне

№	Элемент	Содержание, мг/м ³	Содержание в ПДК в атмосферном воздухе	Содержание в ПДК воздуха рабочей зоны
1	½ дихлорэтан ClCH ₂ -CH ₂ Cl	0,27200	0,09	0,009
2	Ацетальдегид CH ₃ CHO	0,98600	98,60	0,1972
3	Ацетон C ₃ H ₆ O	197,33000	563,80	0,2467
4	Бензол	0,12500	0,4167	0,0083
5	Винилацетат CH ₃ CH(OH)CH ₃	0,24300	1,62	0,0081
6	Изопропанол CH ₃ H ₈ O	0,54700	0,9117	0,0547
7	Ксилол (CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	5,5100	27,55	0,0367
8	Стирол C ₃ H ₈	2,90000	72,50	0,097
9	Толуол	4,20200	70,03	0,028
10	Трихлорметан CHCl ₃	490,20000	4900,20	49,02
11	Циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	0,12800	3,20	0,004
12	Этилацетат	0,07000	0,700	0,00035
13	Этилбензол	5,53000	276,50	0,03690

	$C_6H_5CH_2CH_3$		
--	------------------	--	--

В табл. 4 представлены результаты анализа воздушной пробы, подвергнутой воздействию СНС микроволновым разрядом по схеме рис. 1 в металлической (дюралевой) камере объёмом 1000 см³. Использовались одиночные импульсы мощностью $P_i = 250$ кВт и длительностью $\tau_{MW} = 1$ мс. Полное число импульсов $N_i = 45$. Плотность энерговыделения, суммарная по всем 45 импульсам и отнесённая ко всему газовому объёму реактора, составляла $\sim 11,25$ Дж/см³.

Как следует из табл. 1, из 13 зарегистрированных в составе газового забора из Лефортовского тоннеля элементов 9 не превышают предельно допустимые концентрации (ПДК). В то же время обнаружено 4 загрязнителя, содержание которых оказывается больше допустимых величин. Один из них – *стирол* – характеризуется относительно небольшим превышением: 1,15 ПДК. Однако существуют три других элемента: *ацетальдегид* (7,5 ПДК), *этилбензол* (4,76 ПДК) и, наконец, *трихлорметан* (15,0 ПДК). Обработка взятого в Лефортовском тоннеле образца газа серий СНС-разрядов привела к существенному уменьшению

содержания наиболее опасных компонентов: *ацетальдегида* в 2,75 раз, *этилбензола* в 4,76 раз, *трихлорметана* в 5,49 раз и *стирола* в 3,75 раз. При этом содержание как *стирола*, так и *этилбензола* снизилось до уровня, меньшего или равного ПДК. Содержание же девяти компонентов, исходно не превышающих допустимых величин, по-прежнему осталось меньшим уровня ПДК.

Нет сомнений в том, что увеличение числа обрабатываемых газовый образец разрядов может свести к допустимым значениям содержания как *трихлорметана*, так и *ацетальдегида*.

Анализ состава газового забора, произведённого в рабочей зоне подмосковного малотоннажного лакокрасочного производства (см. табл. 3), свидетельствует о том, что у девяти из тринадцати зарегистрированных элементов концентрация оказывается намного (от 2 до 560 раз) превосходит ПДК для атмосферного городского воздуха. Однако по значениям ПДК для рабочих помещений допустимую величину концентрации превосходит лишь один компонент – *трихлорметан*. При этом превышение весьма значительно, достигая 50.

Таблица 4

Состав обработанного СНС-разрядом воздушного забора, из рабочего помещения

№	Элемент	Содержание, мг/м ³	Содержание в ПДК в атмосферном воздухе	Содержание в ПДК воздуха рабочей зоны
1	½ дихлорэтан ClCH ₂ -CH ₂ Cl	0,21600	0,072	0,0072
2	Ацетальдегид CH ₃ CHO	0,46200	46,20	0,0924
3	Ацетон C ₃ H ₆ O	19,54000	55,828	0,0244
4	Бензол	0,01240	0,0413	0,0008
5	Винилацетат CH ₃ CH(OH)CH ₃	0,21800	1,4533	0,0073
6	Изопропанол CH ₃ H ₈ O	2,36000	3,9333	0,2360
7	Ксилол (CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	3,80084	19,0042	0,02500
8	Стирол C ₃ H ₈	0,41000	10,2500	0,1267
9	Толуол	0,18500	0,3083	0,00123
10	Трихлорметан CHCl ₃	31,20000	312,00	3,12
11	Циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	0,04000	1,00	0,0013
12	Этилацетат	0,07000	0,7000	0,00035
13	Этилбензол C ₆ H ₅ CH ₂ CH ₃	0,25100	12,55	0,001673

После обработки газового забора серией СНС-разрядов (см. табл. 4) содержание двенадцати зарегистрированных загрязнителей уменьшилось в 1,25–23 раза, оказываясь у всех компонент, кроме *трихлорметана*, ниже предельно допустимых для рабочих помещений величин. Однако заметное уменьшение концентрации (более чем в 15 раз) этого наиболее сильного загрязнителя приблизило его содержание после обработки газа микроволновым разрядом к предельно допустимому в рабочей зоне (от 49 до 3,12 ПДК).

Возможные перспективы применения

Проведённые эксперименты подтвердили продемонстрированные и обсуждённые ранее особенности сильно подпорогового разряда в пучке микроволн как средства плазмохимического воздействия на газовую среду. Разряд этот развивается в виде ионизационной волны, распространяющейся навстречу микроволновому излучению, как последовательность «микровзрывов» в тонких канальных («нитевидных») структурах. Физика формирования ионизационной волны заключается в чередовании несамостоятельного разряда, поддерживаемого «фронтальным» УФ-излучением, с самоподдерживающимся разрядом, возникающим в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости, достигающей в микроволновых полях сильно нелинейной стадии (см. [2–6]). В основе плазмохимического воздействия лежат процессы быстрого нагрева газовой среды в формирующих структуру «нитях» (скорость эта достигает величин $dT_g/dt \geq 10^4$ кК/с) и быстрого же охлаждения областей контракции до температур окружающей газовой среды (со скоростью $-dT_g/dt \approx -10^3$ кК/с). В соответствии с такого рода термодинамическими особенностями, СНС-разряд может быть представлен как плазмохимический объект с локально возникающими реакторами: реактора быстрого нагрева газа и реактора быстрого охлаждения, обеспечивающими эффективное разложение молекул и эффективную же «закалку» продуктов разложения с сильно затруднённой возможностью проявления обратных реакций [8, 9].

В описанных выше экспериментах впервые на образцах заборов воздуха из характерных для современного мегаполиса воздушных сред продемонстрированы возможности восстановления экологической чистоты городской атмосферы с помощью СНС-разрядов. Обращаясь к проблеме энергетической эффективности использования в этих целях «самоподдерживающегося несамостоятельного» разряда можно – на основе проведённого в настоящей работе эксперимента – предложить приближённую (требующую дальнейшего уточне-

ния) величину цены очистки одного м³ воздушной среды. Предположим для этого, что обработка газовых объёмов осуществляется с помощью гиротрона, аналогичного применённому в эксперименте, и описанному в настоящей статье, но действующего в импульсно-периодическом режиме. При этом параметры микроволнового импульса соответствуют параметрам одиночных импульсов, используемых в настоящей работе. Режим гиротрона в предполагаемом варианте обработки может быть следующим: частота посылок импульсов $f = 20$ Гц, длительность импульса $\tau_{MW} = 4$ мс, мощность импульса $P_i = 250$ кВт. Тогда средняя мощность P_{cp} микроволнового импульса составит примерно 20 кВт, а удельная энергетическая цена обработки:

$$\eta \geq 5 \times 10^{-3} \text{ кВт час/л.} \quad (3)$$

Эта достаточно высокая цена обработки может быть оправдана совокупностью специфических свойств, присущих СНС-разряду и существенно расширяющих возможности базирующегося на нём метода очистки городской атмосферы. К числу особенностей СНС-разряда, делающих его применение весьма перспективным, можно отнести следующие:

- возможность возбуждения под действием пучка микроволн в воздушной среде, в газах и газовых смесях атмосферного (и более высокого) давления без привлечения систем вакуумирования и требующих энергетических затрат инициаторов;
- существование СНС в виде ионизационной волны, распространяющейся навстречу микроволновому излучению и захватывающей значительные объёмы обрабатываемой газовой среды;
- возможность одновременного вывода (очистки) из обрабатываемого газа широкого круга экологически вредных примесей;
- одновременно с «химической» очисткой осуществление высокоэффективного обеззараживания обрабатываемой газовой среды;
- возможность возбуждения СНС-разряда как в замкнутых объёмах, так и в свободном воздушном пространстве у поверхности земли и на относительно больших расстояниях от неё и т. д.

Варианты применения подпорогового микроволнового разряда последовательно изображены на рис. 4–6. На рис. 4 показана схема возбуждения СНС в приземной атмосфере с использованием в качестве инициатора разработанную и используемую в ИОФРАН систему хаотически переплетающегося множества тонких проводов из нержавеющей стали. Перемещение инициатора с вводом его в формируемый наземным генератором микроволновый пучок осуществляется с помощью беспилотного летательного аппарата. Вариант приме-

ним, в частности, для очистки городской атмосферы от локализованных выбросов фреонов (см. [16]).

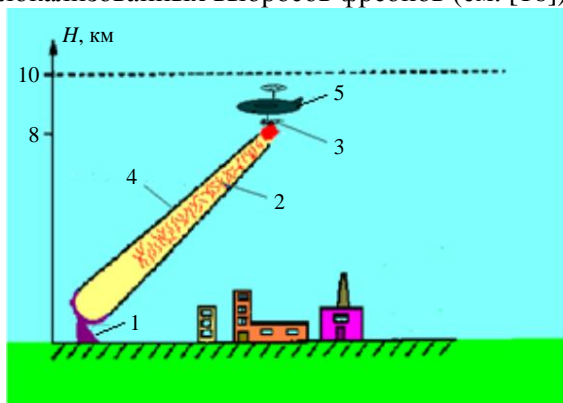


Рис. 4. Схематическое изображение системы очистки атмосферы на основе СНС-разряда. 1 – гиротрон и микроволновая антенна; 2 – СНС-разряд; 3 – инициатор; 4 – микроволновый пучок; 5 – беспилотник.

На рис. 5 СНС-разряд используется для очистки газовых выбросов промышленного производства непосредственно в трубах предприятия.

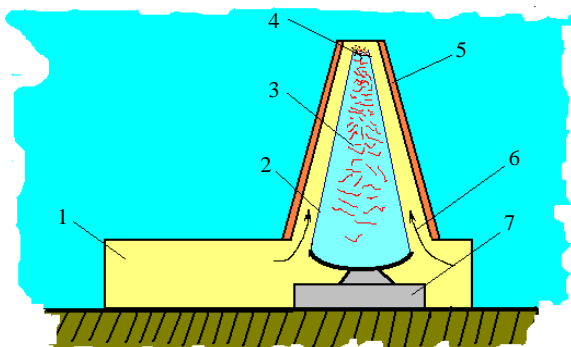


Рис. 5. Схематическое изображение системы очистки промышленных выбросов газа на основе СНС-разряда. 1 – заводское здание; 2 – микроволновый пучок; 3 – СНС-разряд; 4 – инициатор; 5 – дымоход; 7 – гиротрон и антенна.

И, наконец, на рис. 6 исследуемый разряд рассматривается, как основа системы, осуществляющей очистку и обеззараживание воздуха непосредственно в помещениях производства.

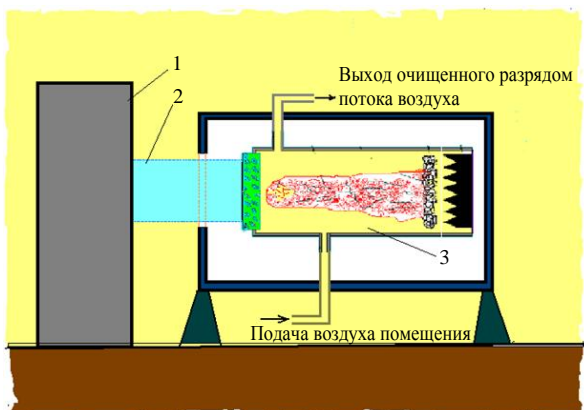


Рис. 6. Схематическое изображение основанной на СНС-

разряде системы очистки воздушной среды в производственных помещениях. 1 – гиротронный комплекс; 2 – микроволновый пучок; 3 – плазмохимический реактор.

Заключение

В работе приведены первые результаты использования в качестве основы метода плазмохимической очистки городской воздушной среды от экологически опасных загрязнений подпорогового микроволнового разряда (самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) разряда), возбуждаемого пучком микроволн. Пучок микроволн создается гиротронным излучателем, генерирующим одиночные импульсы мощностью ≤ 600 кВт, длительностью ≤ 20 мс при длине волны 0,4 см. На двух образцах воздуха, изъятых из реальной атмосферы г. Москвы, в лабораторных экспериментах, проведенных в ИОФ РАН, продемонстрирована высокая эффективность одновременного снижения содержания характерных для современного большого города вредных веществ, поставляемых в атмосферу городским транспортом и промышленностью. Предложены различные варианты использования СНС-разрядов для решения задач обеспечения экологической чистоты воздушной среды мегаполисов.

Проведение экспериментов, уточняющих энергетическую цену воздействия микроволновым пучком на загрязненную городскую атмосферу, и проведение технического и физического анализа проблемы плазмохимического электроразрядного восстановления экологической безопасности городской среды являются основными задачами последующих исследований в ИОФ РАН.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ № 17-12-01352).

ЛИТЕРАТУРА

1. Batanov G. M., Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Magunov A. N., Silakov V. P., Tarasova N. M. High-Pressure Microwave Discharge // Transaction of FIAN. 1985. Vol. 160. P. 174.
2. Kossyi I. A. Self-/Non-Self Sustained Microwave Discharge as a New Type of Large Size Plasma Source / 41th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006, Report AIAA-2006-1457.
3. Kossyi I. A., Gritsinin S. I., Davydov A. M. Nonlinear Phenomena Inherent in Microwave Discharge Physics as a Basis of a New Plasmatrons Device / VIII Intern. Workshop "Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, Book of Abstracts", Zvenigorod, Russia, 2012.
4. Kossyi I. A. New Microwave Plasma Sources Based on the Latest Advances of Fundamental Gas-Discharge Physics / Proceedings of VIII International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves Sources and Applications", N. Novgorod – St. Petersburg, Russia, 2011. P. 25.
5. Ким А. В., Фрайман Г. М. // Физика плазмы. 1983. Т. 9.

№ 3. С. 613.

6. Аветисов В. Г., Грицинин С. И., Ким А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 306.

7. Аскаръян Г. А., Батанов Г. М., Бархударов А. Э., Грицинин С. И., Корчагина Е. Г., Коссыи И. А., Силаков В. П., Тарасова Н. М. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1198.

8. Gritsinin S. I., Knyazev V. Yu., Kossyi I. A., Popov N. A. // Plasma Physics Reports. 2006. Vol. 32. No. 6. P. 520.

9. Gritsinin S. I., Gushchin P. A., Davydov A. M., Ivanov E. V., Kossyi I. A., Misakyan M. A. // Plasma Physics Reports. 2009. Vol. 35. No. 11. P. 933.

10. Parkhomenko Yu. N., Polisan A. A., Skryleva E. A., Tabachkova N. Yu., Shul'ga N. Yu., Davydov A. M., Kossyi I. A., Duyzhikov I. N., Pokalyakin V. T. // Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41. No. 8. P. 491.

11. Batanov G. M., Belousov V. I., Bondar' Yu. F., Borzosekov V. D., Vasikov D. G., Grebenshchikov S. E., Ivannikov I.

A., Kolik L. V., Konchekov E. M., Malakhov D. V., Matveev N. V., Meshcheryakov A. I., Petrov A. E., Sarkcyan K. A., Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Kharchev N. K., Kholnov Yu. V., Tayi E. M. // Prikl. Fiz., 2012. No. 6. P. 79.

12. Batanov G. M., Kolik L. V., Kurbatov V. I., Petrov A. E., Sapozhnikov A. V., Sarsian K. A., Shatz M. G. // Sov. Fizika Plazmy. 1986. Vol. 18. P. 1198.

13. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics (Nauka, Moscow, 1987, Springer-Verlag: Berlin, 1991).

14. Brovkin V. G., Bykov D. F., Golubev S. K. et al. // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 1991. Vol. 61. No. 2. P. 153.

15. Berezhetskaya N. K., Bol'shakov E. F., Eletsii A. V., Kossyi I. A., Taktakishvili M. I. // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 1984. Vol. 54. No. 6. P. 1219.

16. Batanov G. M., Kossyi I. A., Silakov V. B. // Plasma Physics Reports. 2002. Vol. 28. No. 3. P. 204.

PACS: 52.80.Pi

Plasma-chemical cleaning of air from the urban pollution by the subthreshold discharge excited by microwave beams

G. M. Batanov¹, N. K. Berezhetskaya¹, A. M. Davydov¹, E. M. Konchekov¹, I. N. Katorgin²,
I. A. Kossyi¹, K. A. Sarksyian¹, V. D. Stepakhin¹, S. M. Temchin¹, and N. K. Kharchev¹

¹ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: bereg@fpl.gpi.ru

² Ecostandart group
13/16 Perevedenovskiy lane, Moscow, 105082, Russia

Received August 10, 2017

The first results of the application of a new type of microwave discharge (subthreshold self/non-self sustained (SNSS) discharge) as a method of plasmachemical cleansing of urban atmosphere from the ecologically harmful admixtures are presented. Microwave beam exciting discharge is created by GYROTRON generator emitting single pulses having power $P_i \leq 600$ kW, pulse duration $\tau_i \leq 20$ ms and wavelength $\lambda = 0.4$ cm. The experiments performed in General Physics Institute of RAS with two air samples taken out from real Moscow atmosphere have demonstrated high efficiency of simultaneous reduction of ecologically harmful contaminations (supplied by urban transport and industry) due to the SNSS discharge treatment. On the basis of carried out investigations schemes of SNSS discharge application for modern megalopolis topical problems solving have been suggested.

Keywords: plasmachemicals, microwave discharge, SNSS (self/non-self-sustained) discharge.

REFERENCES

1. G. M. Batanov, S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, A. N. Magunov, V. P. Silakov, and N. M. Tarasova, Transaction of FIAN. **160**, 174 (1985).
2. I. A. Kossyi. *Self-/Non-Self Sustained Microwave Discharge as a New Type of Large Size Plasma Source*, in Proc. 41th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, (Reno, Nevada, 2006), Report AIAA-2006-1457.
3. I. A. Kossyi, S. I. Gritsinin, and A. M. Davydov. *Nonlinear Phenomena Inherent in Microwave Discharge Physics as a Basis of a New Plasmatron Device*, in Proc. VIII Intern. Workshop "Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, Book of Abstracts", (Zvenigorod, Russia, 2012).

4. I. A. Kossyi. *New Microwave Plasma Sources Based on the Latest Advances of Fundamental Gas-Discharge Physics*, in *Proceedings of VIII International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves Sources and Applications"*, (N. Novgorod – St. Petersburg, Russia, 2011). P. 25.
5. A. V. Kim and G. M. Fraiman, *Fizika Plazmy* **9** (3), 613 (1983).
6. V. G. Avetisov, S. N. Gritsinin, A. V. Kim, et al., *Pisma ZhETF* **51** (6), 306 (1990).
7. G. A. Askar'yan, G. M. Batanov, A. E. Barkhudarov, et al., *Fizika Plazmy* **18** (9), 1198 (1992).
8. S. I. Gritsinin, V. Yu. Knyazev, I. A. Kossyi, and N. A. Popov. *Plasma Physics Reports*. **32** (6), 520 (2006).
9. S. I. Gritsinin, P. A. Gushchin, A. M. Davydov, E. V. Ivanov, I. A. Kossyi, and M. A. Misakyan. *Plasma Physics Reports*. **35** (11), 933 (2009).
10. Yu. N. Parkhomenko, A. A. Polisan, E. A. Skryleva, N. Yu. Tabachkova, N. Yu. Shul'ga, A. M. Davydov, I. A. Kossyi, I. N. Duyzhikov, and V. T. Pokalyakin, *Russian Microelectronics* **41** (8), 491 (2012).
11. G. M. Batanov, V. I. Belousov, Yu. F. Bondar', V. D. Borzosekov, D. G. Vasikov, S. E. Grebenschikov, I. A. Ivannikov, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, D. V. Malakhov, N. V. Matveev, A. I. Meshcheryakov, A. E. Petrov, K. A. Sarkcyan, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, N. K. Kharchev, Yu. V. Kholnov, and E. M. Tayi, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 79 (2012).
12. G. M. Batanov, L. V. Kolik, V. I. Kurbatov, A. E. Petrov, A. V. Sapozhnikov, K. A. Sarsian, and M. G. Shatz, *Fizika Plazmy* **18**, 1198 (1986).
13. Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Springer-Verlag: Berlin, 1991; Nauka, Moscow, 1987).
14. V. G. Brovkin, D. F. Bykov, S. K. Golubev, et al. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. **61** (2), 153 (1991).
15. N. K. Berezhetskaya, E. F. Bol'shakov, A. V. Eletskii, I. A. Kossyi, and M. I. Taktakishvili. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. **54** (6), 1219 (1984).
16. G. M. Batanov, I. A. Kossyi, and V. B. Silakov. *Plasma Physics Reports*. **28** (3), 204 (2002).