

УДК 537.525.5, 546.17-5

## СТРУКТУРА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ

*Н.А. Шарпов, А.В. Хинкис, С.И. Гаджихалилова, Т.В. Мельник, А.В. Парфенов**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Данная работа является частью проектно-исследовательской программы по созданию медицинского оборудования нового поколения. В статье представлены результаты исследования, объектом которого является неравновесная плазма импульсных разрядов в потоке воздуха при атмосферном давлении. Использование термически неравновесной плазмы в плазмохимическом реакторе для генерации оксида азота позволяет, с одной стороны, получить высокую эффективность выхода конечного продукта, с другой стороны, существенно снизить энергозатраты за счёт исключения цепочки нагрев газа—охлаждение газа в сравнении с устройствами, использующими равновесную плазму. Немаловажное свойство разрабатываемого устройства — возможность регулирования в широком диапазоне содержания оксида азота в выходном потоке, что является необходимым фактором для лечения различных патологий. Спецификой применяемой методики является использование разрядной камеры в контуре возбуждения, что даёт возможность тонкого регулирования параметров и геометрических характеристик разряда. В статье описываются форма и конструкция разрядного канала, оценивается интегральный энергетический баланс разрядных систем с различными скоростями газового потока и разными величинами вводимой при импульсе энергии. Особый интерес представляет то, что при вводе в контур даже небольшого количества энергии (около 5 мДж) образование импульса в разрядном канале происходит стабильно. Это означает, что даже при указанных условиях разрядный канал занимает относительно большой объём в камере, т.е. плотность тока на оси разряда, где и протекают плазмохимические реакции, невелика.

**Ключевые слова:** плазменная медицина, оксид азота, неравновесная плазма, импульсный разряд, NO-терапия.

## STRUCTURE OF PULSE DISCHARGE WITH VARIABLE REPETITION RATE

*N.A. Sharapov, A.V. Khinkis, S.I. Gadzhikhalilova, T.V. Melnik, A.V. Parfenov**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

This work is a follow-up of design-research program to develop a new generation of medical equipment based on plasma-chemical reactor to synthesize nitric oxide from atmospheric air. The paper outlines results of the study of a non-equilibrium plasma of pulsed discharges in air stream at atmospheric pressure. On the one hand, the use of thermal non-equilibrium plasma in the plasma-chemical reactor allows obtaining high efficiency in nitric oxide generation; on the other, through skipping the gas heating-cooling stage it decreases dramatically the energy consumption if compared with the equilibrium plasma approach. One of advantages of this device is an opportunity to control nitrogen oxide content in the output flow in wide range of concentrations, what is necessary at some medical treatments. The specificity of the system used deals with engaging the discharge chamber into the oscillating pulse excitation circuit which allows fine-tuning parameters and geometry of discharge. The paper is focused on describing the shape and the structure of discharge channel and its volume. An integral energy balance is estimated for discharge systems having different gas flow rates and values of the pulse energy input. A shown stable formation of the channel impulse under small values of energy input into the circuit (as low as 5 mJ) is of particular interest. Even under these conditions the channel still occupies a relatively large volume in space (indicating a low current density on the axis) where plasma-chemical reactions develop.

**Key words:** plasma medicine, nitric oxide, NO-therapy, non-equilibrium plasma, pulse discharge.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-61-64

## ВВЕДЕНИЕ

Плазма используется в медицине сравнительно недолго: лишь последние 15—20 лет. В настоящее время плазменную медицину можно считать одним из перспективных направлений. В конце 1990-х годов по результатам медико-биологических испытаний в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан не имеющий аналогов в мире высокоэкономичный, эффективный и универсальный воздушно-плазменный медицинский аппарат СКВП/NO-01 «ПЛАЗОН» для хирургии и NO-терапии, применяющийся в настоящее время в лечебных учреждениях Министерства обороны и клиниках Министерства здравоохранения на территории Российской Федерации [1, 2]. Принцип работы аппарата основан на взаимодействии атмосферного воздуха с плазмой дугового разряда постоянного тока. Плазма образуется внутри микроплазмотрона — рабочего органа аппарата. Температура плазмы на выходе из анода микроплазмотрона достигает 3000—3500 °С. При удалении от анода температура достаточно быстро уменьшается, и на расстоянии 20—30 мм истекающий поток представляет собой просто струю горячего газа, содержащего

молекулы оксида азота. Оценки показывают, что в условиях дугового разряда параметры плазмы близки к равновесным и основная доля энергии неэффективно расходуется на разогрев газа в целом. Кроме того, для фиксации образовавшихся окислов азота необходимы чрезвычайно большие скорости охлаждения (заковки) от  $1 \cdot 10^7$  до  $10^8$  град·с<sup>-1</sup> [3], поскольку молекула NO является нестабильной и при атмосферном давлении и комнатной температуре она практически мгновенно разлагается на исходные составляющие и доокисляется, переходя в более устойчивую форму NO<sub>2</sub>. Поскольку воздушно-плазменный медицинский аппарат «ПЛАЗОН», как было сказано, является универсальным, т.е. используется в хирургии и терапии, то была поставлена задача создать новый медицинский аппарат, предназначенный преимущественно для терапевтических целей — NO-терапии (генерации оксида азота).

## ЭКСПЕРИМЕНТ



Рис. 1. Внешний вид аксиального разряда

Для решения данной задачи был сконструирован плазмохимический реактор (ПХР), в котором реализуется процесс генерации оксида азота, с использованием неравновесной плазмы коротких импульсных разрядов с различной частотой повторения (рис. 1).

Использование термически неравновесной плазмы по сравнению с равновесной имеет ряд преимуществ: меньшие энергозатраты на получение конечного продукта, значительное упрощение конструкции аппарата за счёт исключения системы водяного охлаждения и устройств заковки, возможность гибкого управления выходными характеристиками. Результаты исследований ПХР подробно опубликованы в [4].

Неясным оставался один вопрос: тип разряда, реализованный в устройстве. По этому поводу было высказано несколько мнений.

В данной работе предпринята попытка прояснить этот вопрос, определить тип и структуру разряда при импульсном вводе энергии с переменной частотой повторения. В прототипе плазмохимического реактора (ПХР) используется линейная (аксиальная) геометрия разрядной камеры, разряд в которой по внешнему виду напоминает колокол (см. рис. 1). Для более детального рассмотрения было принято решение развернуть разряд в плоскости, т.е. использовать коаксиальную геометрию устройства.

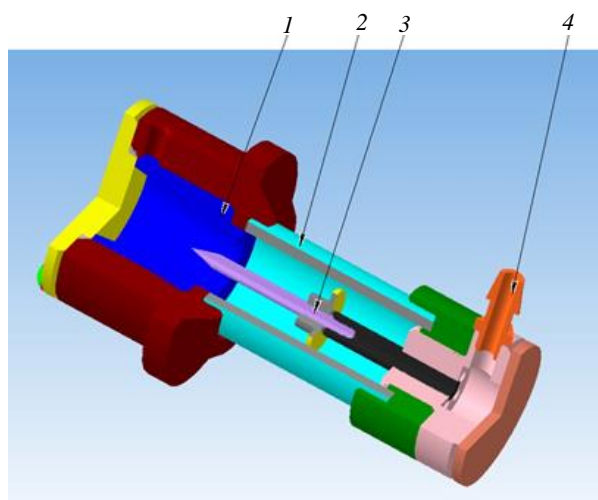


Рис. 2. Экспериментальная модель разрядной камеры: 1 — анодный узел; 2 — кварцевая вставка; 3 — катод; 4 — штуцер для ввода плазмообразующего газа в рабочую зону устройств

В ходе работы использовались специализированный экспериментальный стенд и модернизированная разрядная камера с радиальной геометрией (рис. 2). Стенд обеспечивал гибкое управление вкладываемой энергией в импульсе (от 5 до 40 мДж), позволял изменять временные параметры разряда (длительность энерговыделения в импульсе, паузу между импульсами) и варьировать средними характеристиками за счёт частоты повторения импульсов (от 100 до 10 000 Гц) и расхода плазмообразующего газа (1—10 л/мин). Одновременно регистрировались форма и параметры разрядного тока (длительность и амплитуда полуволн). Разрядная камера (см. рис. 2) представляет собой кварцевую вставку с внутренним диаметром трубки 18 мм и с наборным подвижным катодом. Анод выполнен в виде сменных профилированных вставок.

Особенность реализуемого импульсного разряда заключается в способе ввода энергии в разрядный объём [4]. Все процессы ввода энергии и генерации происходят в период действия импульса, поэтому определяющими будут именно характеристики в оди-

ночном импульсе, а средние параметры разряда и выходные характеристики определяются частотой его повторения.

Сама рабочая камера является элементом колебательного контура, в котором и происходит выделение энергии. Такое включение реактора обладает рядом преимуществ, а именно: формирование профиля и амплитуды разрядного тока, временное ограничение энерговыделения.

В экспериментах энергия вводилась в контур в виде коротких импульсов величиной 5—40 мДж и длительностью 50—55 мкс. При этом в контуре возбуждались высокочастотные колебания (1—10 МГц) и происходил пробой межэлектродного промежутка. Характерные осциллограммы процесса показаны на рис. 3. Кривая 1 представляет собой форму импульсного тока ввода энергии в индуктивный элемент контура, кривая 2 — форму разрядного тока в экспериментальной модели устройства. Амплитуда, форма и временные характеристики разрядного тока зависят от геометрии камеры, параметров колебательного контура, расхода газа и величины вводимой энергии.

Энергия, вкладываемая в разряд, пропорциональна энергии, вводимой в контур, часть из которой неизбежно теряется. Ввод энергии в контур дозируется и контролируется в каждом им-

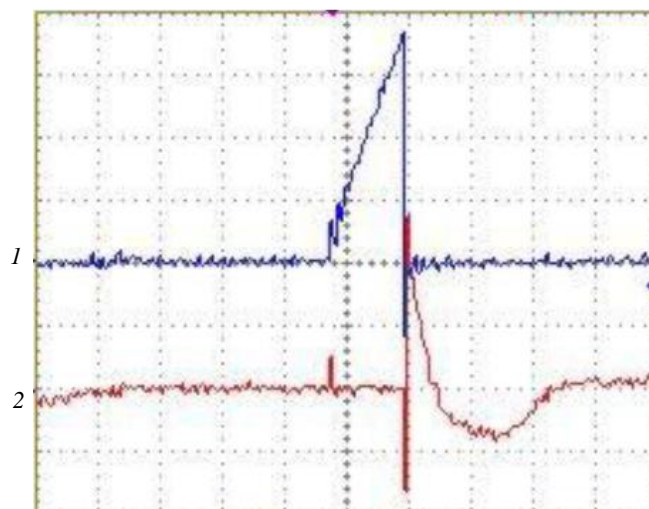


Рис. 3. Осциллограмма импульсов тока ввода энергии в контур (1) и разрядного тока в ПХР (2)

пульсе. Для определения доли, выделившейся в разряде, был проведён цикл калориметрических исследований [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены экспериментально полученные данные энергобаланса исследуемого образца ПХР с учётом всех потерь. На нём прямыми линиями изображены суммарные тепловые потери в электроды и тяжёлый газовый компонент в зависимости от расхода для трёх уровней мощности, вводимой в разрядный контур, пунктирными — мощность накачки для трёх уровней тока, но уже с учётом потерь в индуктивном элементе. Результаты исследований позволяют оценить среднюю мощность, вводимую в разряд. Таким образом, мы можем оценить энергию, введённую в каждый отдельно взятый разрядный канал.

Характерный вид частотного импульсного разряда показан на фотографиях рис. 5. Разряд представляет собой проводящий канал, образованный между двумя электродами. В отдельно взятый момент времени существует только один канал. С каждым новым импульсом канал образуется в новом месте. Временные характеристики возбуждения разряда подобраны таким образом, чтобы новый импульс подавался только после полного рас-

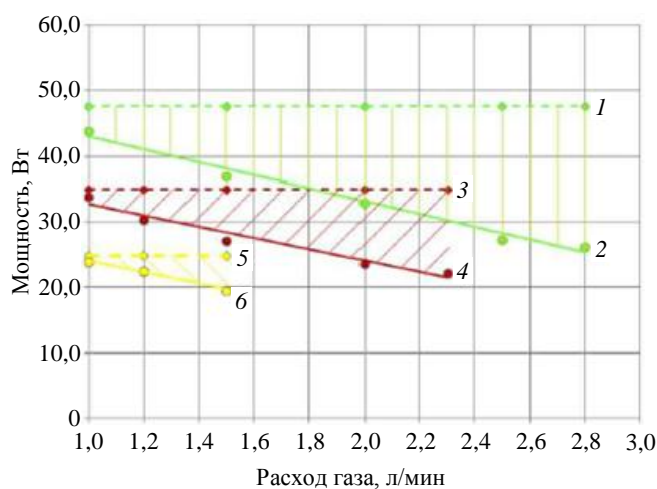


Рис. 4. Зависимость мощности, введённой в разряд (с учётом потерь в трансформаторе) от тока ввода энергии в контур и расхода воздуха: 1, 3, 5 — мощность, введённая в разряд; 2, 4, 6 — суммарная мощность потерь,  $E = 25, 21, 18$  мДж соответственно

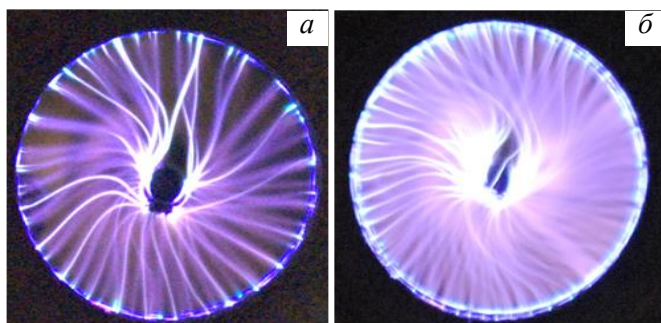


Рис. 5. Внешний вид разряда при энергии ввода  $E_{им} = 5$  мДж, расходе газа  $Q = 4$  л/мин и частоте повторения импульсов  $f = 1300$  (а), 2800 Гц (б)

пада предыдущего. Такой режим и определяет форму существования разряда. Множество каналов на фотографиях объясняется высокой частотой повторения и временем выдержки фотоаппаратуры.

Как видно на рис. 5, при увеличении частоты повторения импульсов (или при уменьшении расхода газа) уменьшается шаг между соседними каналами. На рис. 5 показан внешний вид разряда на частотах  $f = 1300$  Гц (см. рис. 5, а) и  $f = 2800$  Гц (см. рис. 5, б) при одинаковом расходе  $Q = 4$  л/мин и одинаковой энергии. Похожая картина наблюдается и при одинаковой частоте импульсов, но разных расходах. Изменение шага связано (зависит) с изменением среды в зоне разряда, при высоком расходе и низкой частоте фоновая (среднемассовая) температура понижается, обновление среды происходит быстрее, т.е. уменьшается время пребывания элементарного объёма газа в зоне разряда.

При больших энергиях в импульсе и высокой частоте повторения (или малых расходах) разряд переходит в дуговую форму, что характеризуется наличием единственного канала и высокой фоновой температурой. Данный режим крайне невыгоден в плане генерации оксида азота.

В дальнейшем предполагается с помощью высокоскоростной съёмки зафиксировать и изучить отдельно взятый канал разряда, визуализировать его распространение, а также обосновать его тип.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагапов А.П., Пекшев А.В., Шаратов Н.А. и др. Аппарат «Плазон» — принципы формирования воздушно-плазменных и NO-содержащих газовых потоков. — В кн.: NO-терапия: теоретические аспекты, клинический опыт и проблемы применения экзогенного оксида азота в медицине. Под ред. С.В. Грачева, А.Б. Шехтера, Н.П. Козлова. — М.: ММА, 2001, с. 60—63.
2. Ефименко Н.А., Хрупкин В.И., Марахонич Л.А. и др. Руководство по применению аппарата «ПЛАЗОН» в хирургической практике. Под ред. Н.А. Ефименко. — М.: Государственный институт усовершенствования врачей МО РФ, 2003. 96 с.
3. Гуляев Г.В., Козлов Г.И., Полак Л.С. и др. Кинетика и термодинамика образования окислов азота в плазменной струе. — В кн.: Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. Под ред. Л.С. Полака. — М.: Наука, 1965, с. 132.
4. Шаратов Н.А. и др. Исследование воздушного плазмохимического реактора для нового медицинского аппарата. — Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1028.html>.
5. Шаратов Н.А. и др. Калориметрическое исследование энергетического баланса плазмохимического реактора. — Сборник научных трудов по радиационной плазмодинамике, 2012, вып. 9, с. 272.



Николай Алексеевич Шаратов, к. техн. н., лауреат премии Правительства Российской Федерации в области физики и техники низкотемпературной плазмы; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, Россия  
nash1257@yandex.ru



Александр Викторович Хинкис, студент 4-го курса, специализируется в области физики и техники низкотемпературной плазмы; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, Россия  
khinkis@yandex.ru



Сима Исмаиловна Гаджихалилова, студентка 4-го курса, специализируется в области физики и техники низкотемпературной плазмы; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, Россия  
rukiamage@gmail.com



Тарас Викторович Мельник, студент 4-го курса, специализируется в области физики и техники низкотемпературной плазмы; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, Россия



Артем Владимирович Парфенов, студент 4-го курса, специализируется в области физики и техники низкотемпературной плазмы; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, Россия

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2017 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 61—64.