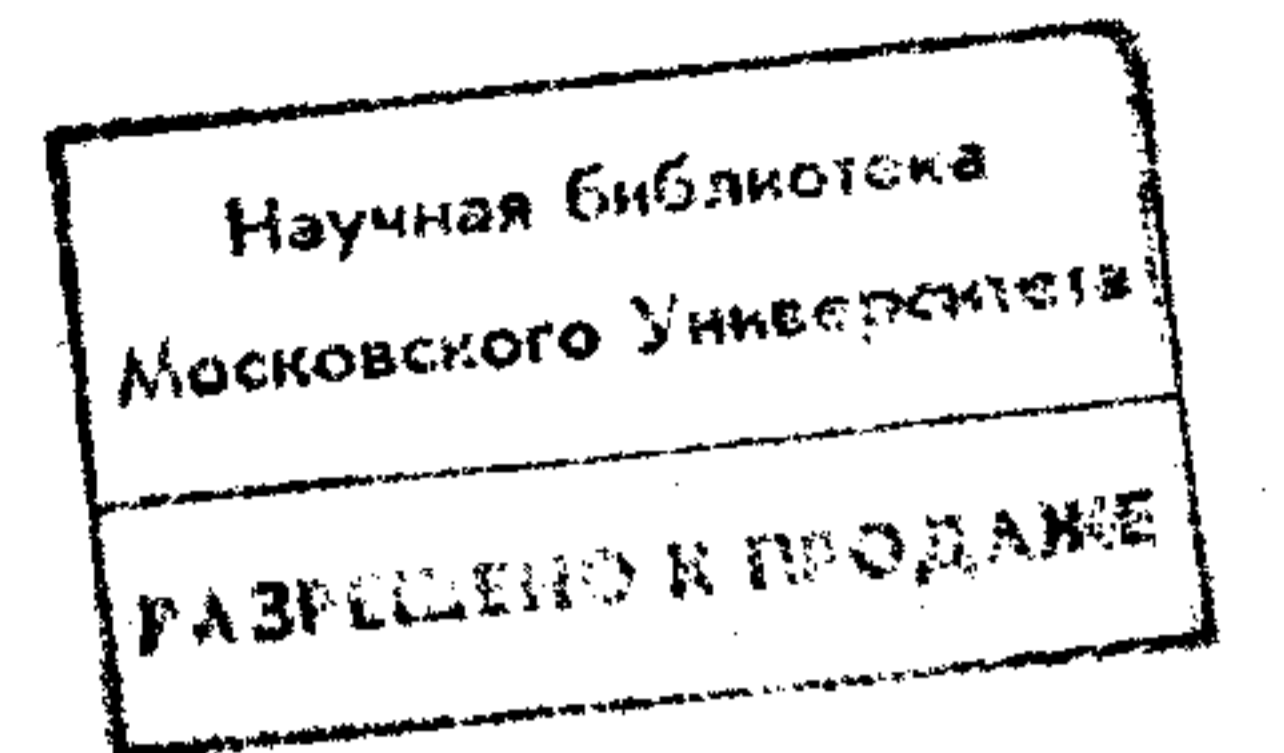


А.С. ЗАРИН, А.А. КУЗОВНИКОВ,

В.М. ШИБКОВ



**СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ  
СВЧ-РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ**

КН 6

Москва

“Нефть и газ”

1996

ББК 22. 333

З 34

УДК 533.9

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета  
Государственной академии Нефти и Газа им.И.М.Губкина

Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в  
воздухе: Моногр. –М: Нефть и Газ, 1996. –204с. – ISBN 5-7246-0033-1.

Монография отражает современный уровень исследований в области неравновесной  
низкотемпературной плазмы свободно локализованного разряда в воздухе. В ней обобщены и  
систематизированы результаты экспериментальных исследований нестационарной  
молекулярной плазмы СВЧ-разряда в воздухе при давлении  $0,1 \div 760$  Тор, формируемого при  
различных импульсных режимах в заданной области пространства мощным сфокусированным  
пучком электромагнитного излучения сантиметрового диапазона длин волн с плотностью  
потока мощности в фокусе пучка  $10^2 \div 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Особое внимание уделено оптимизации  
режима создания СВЧ-разряда с целью эффективного перераспределения энергии между  
различными компонентами и степенями свободы молекулярного газа.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в  
области физики плазмы и газового разряда, атомной и молекулярной физики, физической и  
химической кинетики, а также в смежных областях физики.

Табл. 8. Ил. 110. Библиогр. 268 назв.

ISBN 5-7246-0033-1

© А.С.Зарин, А.А.Кузовников, В.М.Шибков, 1996

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .	5
<b>ГЛАВА 1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННОГО СВЧ-РАЗРЯДА В СФОКУСИРОВАННОМ ПУЧКЕ . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1. СВЧ-разряд в свободном пространстве . . . . .	11
1.2. Экспериментальные стенды . . . . .	21
1.3. Общая картина безэлектродного СВЧ-разряда в воздухе . . . . .	26
1.4. Методы локализации СВЧ-разряда в свободном пространстве . . . . .	29
1.5. Экспериментальное изучение порогов повторного СВЧ- пробоя в диапазоне давлений воздуха $10^{-3} \div 760$ Тор. . . . .	33
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ . . . . .</b>	<b>37</b>
2.1. Оптический метод регистрации функции распределения электронов по энергиям . . . . .	37
2.2. Метод одновременного измерения концентрации и температуры электронов по оптическим данным . . . . .	39
2.3. Методы измерения напряженности электрического поля в плазме СВЧ-разряда . . . . .	44
2.4. Спектроскопический метод измерения температуры газа . . . . .	49
2.5. Метод определения колебательной температуры молекулярной плазмы . . . . .	51
2.6. Интерференционно-голографическая диагностика плазмы . . . . .	52
2.7. Методы регистрации концентрации электронов в плазме при высоких давлениях . . . . .	57
<b>ГЛАВА 3. КИНЕТИКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА . . . . .</b>	<b>61</b>
3.1. Нестационарная кинетическая модель плазмы разряда в сухом воздухе . . . . .	61
3.2. Результаты математического моделирования . . . . .	71
<b>ГЛАВА 4. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ-РАЗРЯДА . . . . .</b>	<b>77</b>
4.1. "Холодное" распределение поля в разрядной камере . . . . .	77
4.2. Поле $E_0$ в плазме безэлектродного СВЧ-разряда в воздухе и смеси гелий-воздух . . . . .	81
<b>ГЛАВА 5. КИНЕТИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННОГО СВЧ-РАЗРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕГО СОЗДАНИЯ . . . . .</b>	<b>84</b>
5.1. Функция распределения электронов по энергиям в безэлектродном СВЧ-разряде в воздухе . . . . .	84
5.2. Измерение концентрации отрицательных ионов в плазме несамостоятельного таунсендовского и СВЧ-разрядов . . . . .	85
5.3. Концентрация и температура электронов в плазме импульсно-периодического СВЧ-разряда в пучности поля . . . . .	87
5.4. Концентрация и температура электронов в плазме "бегущего" СВЧ-разряда . . . . .	92
5.5. Параметры плазмы самостоятельного СВЧ-разряда, создаваемого в режиме программированного импульса . . . . .	96
5.6. Баланс ионизации с учетом ионной кинетики при повторном СВЧ-пробое в воздухе . . . . .	101
5.6.1. Система нелинейных уравнений кинетики ионизации . . . . .	101
5.6.2. Анализ линейного приближения . . . . .	102
5.6.3. Накопление отрицательных ионов в разряде . . . . .	103
5.6.4. Стадия распада . . . . .	104
5.6.5. Роль отрицательных ионов при повторном пробое . . . . .	104

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблемы физики низкотемпературной слабомонизованной плазмы газового разряда в последние годы вновь привлекли повышенный интерес исследователей. Это связано, с одной стороны, с большим многообразием и сложностью протекающих в низкотемпературной плазме явлений и их недостаточной изученностью, с другой - с их важным практическим применением в технологии, плазмохимии, технике. В зависимости от решаемой задачи и в целях достижения оптимальных параметров устройств, включающих в себя плазменные объекты, часто приходится идти по пути усложнения химического состава плазменной среды. Важное место среди газовых разрядов занимают разряды в молекулярных газах. Их особенности по сравнению с разрядами в атомарных газах связаны с увеличением числа внутренних степеней свободы частиц и многообразием неупругих взаимодействий, приводящих к перераспределению энергии внутри молекул и между ними, а также к различным превращениям молекул в разряде, следствием чего является сложный химический состав плазмы. Эти обстоятельства чрезвычайно усложняют картину физических процессов в таких системах, и если физика разрядов в атомарных газах достаточно развита, то процессы в молекулярной газоразрядной плазме изучены на сегодняшний день явно недостаточно. Многообразие взаимодействий, реализующихся в молекулярной газоразрядной плазме, привлекательно как с точки зрения изучения элементарных процессов, так и с точки зрения моделирования природных явлений, исследования которых в последние годы приобрели большую актуальность, например, изучение физических процессов, протекающих в верхних слоях атмосферы.

Успехи в развитии электроники сверхвысоких частот привели к возможности создания новой формы газового разряда - безэлектродного СВЧ-разряда в сфокусированном пучке электромагнитной энергии в свободном пространстве. Особенности СВЧ-накачки являются: технологичность транспортировки энергии и ее ввода в разрядную камеру; эффективность поглощения электромагнитной энергии в плазме разряда; отсутствие неустойчивостей плазмы, инициируемых электродами; длительное сохранение чистоты плазмы из-за отсутствия контакта с электродами и стенками разрядной камеры; возможность создания протяженного однородного разряда; достижение высоких удельных мощностей накачки; избирательность при перераспределении энергии от электронов во внутренние степени свободы молекул. Понимание физики неравновесных плазмохимических систем, к которым

5.7.	Управление уровнем электронной концентрации в плазме повторного СВЧ-разряда.	107
5.8.	Определение концентрации атомарного кислорода в импульсном СВЧ-разряде в воздухе по отношению интенсивностей линии $O(3p^3P \rightarrow 3s^3S)$ и полосы $N_2(C^3\Pi_u(v=0) \rightarrow B^3\Pi_g(\Sigma v_1))$	111
5.9.	Физические механизмы снижения порога повторного СВЧ-пробоя	115
ГЛАВА 6.	КИНЕТИКА НАГРЕВА ГАЗА В СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННОМ СВЧ-РАЗРЯДЕ В СФОКУСИРОВАННОМ ПУЧКЕ.	118
6.1.	Нагрев газа в области существования импульсно-периодического СВЧ-разряда	118
6.2.	Кинетика нагрева газа в зоне существования "бегущего" СВЧ-разряда	121
6.3.	Кинетика перераспределения концентрации нейтральных молекул воздуха в области существования "бегущего" СВЧ-разряда	126
6.4.	Колебательная температура в плазме СВЧ-разряда в воздухе.	128
6.5.	Нагрев газа в локализованном СВЧ-разряде при различных режимах программированного импульса.	130
6.6.	Методы определения параметров плазмы в условиях импульсной модуляции разрядного тока	134
6.7.	Нагрев газа в условиях импульсно-периодического разряда в воздухе.	137
6.8.	Влияние кислорода на кинетику нагрева молекулярного газа в азотно-кислородной смеси.	141
6.9.	Динамика образования каверны в локализованном СВЧ-разряде.	146
6.10.	Тепловая неустойчивость и образование градиентов нейтрального компонента газа при повторном СВЧ-разряде в воздухе.	150
ГЛАВА 7.	ИНИЦИИРОВАННЫЙ СВЧ-РАЗРЯД ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ	156
7.1.	Методы инициации разряда	156
7.2.	Динамика инициированного СВЧ-разряда в воздухе	158
7.3.	Концентрация и температура электронов в канале стимулированного СВЧ-разряда	164
7.4.	Кинетика заряженных частиц в плазме локализованного СВЧ-разряда при различных давлениях воздуха.	167
7.5.	Нагрев газа в локализованном СВЧ-разряде в воздухе.	170
7.6.	Режим медленного горения СВЧ-разряда в сфокусированном пучке при атмосферном давлении	174
7.7.	Локализация разряда в сфокусированном пучке в режиме вертикального подвода СВЧ-энергии	177
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		183
ABSTRACT		197