

УДК 621.387.143
ББК 32.851.2
С21

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Казанского национального исследовательского технологического университета*

*Рецензенты:
д-р физ.-мат. наук У. Н. Закиров
канд. техн. наук А. А. Лопатин*

Саттаров А. Г.
С21 Оптический плазмотрон : монография / А. Г. Саттаров; Минобрнауки
России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ,
2022. – 216 с.

ISBN 978-5-7882-3263-8

Рассмотрены способы поджига и стабилизации непрерывного оптического разряда во внутрикамерном пространстве оптического плазмотрона, проанализированы процессы взаимодействия потока рабочего газа с низкотемпературной плазмой, образованной этим разрядом, выполнен расчет теплового состояния узлов и деталей конструкции.

Предназначена для преподавателей, инженеров и научно-технических работников, занимающихся вопросами получения и применения лазерной плазмы в различных областях техники.

Подготовлена на кафедре медицинской инженерии.

**УДК 621.387.143
ББК 32.851.2**

ISBN 978-5-7882-3263-8 © Саттаров, А. Г., 2022
© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	6
ПРЕДИСЛОВИЕ	8
ВВЕДЕНИЕ	10
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНОВ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ.....	12
1.1. Описание технологического комплекса на основе CO ₂ -лазера	13
1.2. Волоконные лазеры.....	15
1.3. Газодинамическое окно для ввода лазерного излучения в камеру поглощения оптического плазмотрона	25
1.4. Процессы поглощения лазерного излучения в камере оптического плазмотрона	27
1.5. Инициирование и непрерывное поддержание лазерной плазмы в камере поглощения оптического плазмотрона	30
1.6. Лучистые тепловые потоки в камере поглощения оптического плазмотрона.....	32
1.7. Устойчивость непрерывного оптического разряда.....	35
1.8. Применение закрученных течений для стабилизации плазмы в камере поглощения оптического плазмотрона.....	39
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ВО ВНУТРИКАМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОТРОНА	41
2.1. Механизмы возникновения и распространения оптического разряда.....	41
2.2. Теоретические модели оптического разряда	47
2.3. Метод расчета температурного поля плазмы, образованной непрерывным оптическим разрядом	50
2.4. Теоретическое исследование рабочего процесса в камере поглощения оптического плазмотрона на основе осесимметричного закрученного противоточного течения газа	57
3. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОТРОНА	65
3.1. Оценка величины тепловых потоков. Расчет лучистых тепловых потоков по закону Стефана – Больцмана.....	66
3.2. Методика проведения расчетов теплового состояния конструкций оптического плазмотрона	69

3.3. Анализ результатов расчетно-теоретических исследований теплового состояния оптического плазмотрона.....	72
4. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВО ВНУТРИКАМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОТРОНА.....	77
4.1. Основные принципы организации рабочего процесса во внутрикамерном пространстве оптического плазмотрона.....	77
4.2. Схемы организации рабочего процесса во внутрикамерном пространстве оптического плазмотрона.....	77
4.3. Газодинамическое окно оптического плазмотрона	84
5. ИНИЦИИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ – ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО	90
5.1. Способы инициирования оптического разряда	90
5.2. Экспериментальное исследование инициирования множественного непрерывного оптического разряда	92
5.3. Описание лазерного технологического комплекса	94
5.4. Получение плазмы, образованной оптическим разрядом	96
5.5. Инициирование множественных плазменных образований в камере поглощения оптического плазмотрона.....	100
6. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НЕПРЕРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА.....	102
6.1. Определение длины пробега фотона в плазме, образованной непрерывным оптическим разрядом	102
6.2. Измерение излучения плазмы, образованной непрерывным оптическим разрядом	104
6.3. Схема приемника теплового излучения от плазмы непрерывного оптического разряда.....	109
7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОКОН ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОТРОНА.....	112
7.1. Результаты экспериментальных исследований газодинамического окна.....	114
7.2. Канонический анализ полученных моделей	118
7.3. Результаты канонического анализа уравнений регрессии.....	121
7.4. Экспериментальное исследование качественной картины истечения рабочего газа из газодинамического окна оптического плазмотрона.....	129

8. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ГАЗА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ОКНЕ, КАМЕРЕ ПОГЛОЩЕНИЯ И СОПЛЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОТРОНА С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ И ЗАКРУЧЕННЫМ ПРОТИВОТОЧНЫМ ТЕЧЕНИЕМ	136
8.1. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса. Модель Колмогорова–Прандтля.....	136
8.2. Семейство k – ε -моделей	139
8.2.1. Стандартная k – ε -модель	139
8.2.2. RNG k – ε -модель	140
8.2.3. Realizable k – ε -модель	142
8.6. Семейство k – ω -моделей	144
8.7. Исследование процессов течения рабочего газа в ГДО-0 с кольцевым осесимметричным потоком рабочего газа в камере поглощения оптического плазмотрона	148
8.8. Исследование процессов течения рабочего газа в ГДО-1 с осесимметричным противоточным закрученным потоком в камере поглощения оптического плазмотрона.....	158
9. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ «МЕТАН + ВОЗДУХ» В КАМЕРЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	171
9.1. Экспериментальная установка для исследования влияния давления и коэффициента избытка окислителя смеси «метан + воздух» в камере двигателя на работу лазерной свечи	180
9.2. Особенности поджига топливной смеси «метан + воздух» в двигателе внутреннего сгорания.....	185
9.3. Термодинамический расчет процесса горения смеси «метан + воздух» и определение состава продуктов сгорания.....	188
9.4. Испытания лазерной свечи зажигания на экспериментальном двигателе внутреннего сгорания с компонентами топлива «метан + воздух».....	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	203
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	206