

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра аэрофизики и газовой динамики

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА

Монография

Новосибирск
2020

УДК 532.525.2
ББК 32.875
Ф 505

Авторы:

Г. Р. Грек, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко,
Ю. А. Литвиненко, А. Г. Шмаков

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук С. П. Баутин,
д-р физ.-мат. наук С. А. Гапонов

Ф 505 Физические механизмы горения микроструй водорода: Моногр. / Г. Р. Грек, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко и др. ; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2020. — 374 с.

ISBN 978-5-4437-1014-3

В книге представлены результаты большого цикла экспериментальных исследований структуры и характеристик развития механизма диффузионного горения водорода дозвуковых и сверхзвуковых круглых и плоских микроструй. Показаны особенности горения данных течений в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла, скорости их истечения и горения водорода в смеси с другими газами. Обнаружено новое явление при горении микроструи водорода, связанное с образованием так называемой «области перетяжки пламени».

Предназначено для студентов и аспирантов высших учебных заведений технической направленности, а также для инженеров и научных работников, занимающихся изучением механизмов микроструйного горения.

УДК 532.525.2
ББК 32.875

Издание одобрено ученым советом Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН.

Монография написана по материалам гранта РФФИ № 16-19-10330.

© Новосибирский государственный университет, 2020

© Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А.,
Литвиненко М. В., Шмаков А. Г., 2020

ISBN 978-5-4437-1014-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Особенности горения пропана и водорода в микроструях в поперечном акустическом поле и их сравнение.....	3
1.1. Введение	3
1.2. Схема экспериментов	5
1.3. Процедура исследований	6
1.4. Круглая микроструя без горения в поперечном акустическом поле	9
1.5. Бифуркация пламени при горении круглой микроструи газа в поперечном акустическом поле	9
1.5.2. Водород (H_2)	10
1.6. Плоская микроструя без горения в поперечном акустическом поле	13
1.7. Бифуркация пламени при горении плоской микроструи газа в поперечном акустическом поле	13
1.7.1. Пропан (C_3H_8).....	14
1.7.2. Водород (H_2)	14
1.8. Заключение	17
1.9. Список литературы.....	18
Глава 2. Экспериментальное исследование структуры диффузионного пламени при горении круглых и плоских микроструй водорода	20
2.1. Введение	20
2.2. Схема экспериментов и процедура исследований	23
2.3. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе в зависимости от размера выходного отверстия микросопла.....	26
2.3.1. Диаметр сопла $d = 1$ мм	26
2.3.2. Диаметр сопла $d = 0,5$ мм	31
2.3.3. Диаметр сопла $d = 0,25$ мм	38
2.3.4. Скошенное сопло (диаметр сопла $d = 0,44$ мм).....	41

2.3.5. Обсуждение результатов экспериментов	50
2.4. Диффузионное горение водорода в плоской микроструе в зависимости от размера выходной щели микросопла	53
2.4.1. Длина сопла $l = 2$ мм, ширина $h = 0,3$ мм, $l/h = 6,7$	53
2.4.3. Длина сопла $l = 3$ мм, ширина $h = 0,1$ мм, $l/h = 30$	67
2.4.4. Обсуждение результатов экспериментов.....	70
2.5. Заключение	73
2.6. Список литературы.....	74

Глава 3. Экспериментальное исследование горения смеси микроструи водорода с различными газами	76
3.1. Введение	76
3.2. Экспериментальное исследование горения смеси микроструи водорода с метаном, гелием и азотом	77
3.2.1. Методика проведения экспериментов	77
3.2.2. Чистый водород и чистый метан	79
3.2.3. Смесь водорода и метана	80
3.2.4. Смесь водорода с гелием	95
3.2.5. Смесь водорода с азотом	99
3.2.6. Смесь водорода с метаном (весовое и объемное соотношение газов)	103
3.3. Экспериментальное исследование горения смеси микроструи водорода с кислородом	106
3.3.1. Методика проведения экспериментов	106
3.3.2. Результаты экспериментальных исследований	107
3.3.3. Обсуждение и анализ результатов экспериментов.....	116
3.4. Заключение	123
3.5. Список литературы.....	125

Глава 4. Экспериментальное исследование горения микроструи водорода и ее смеси с кислородом, истекающей из криволинейного канала с вихрями Дина.....	127
4.1. Горение круглой микроструи чистого водорода, истекающей из криволинейного канала с вихрями Дина.....	127

4.1.1. Введение.....	127
4.1.2. Диффузионное горение водорода, истекающего из криволинейного канала с вихрями Дина	133
4.1.3. Заключение	141
4.1.4. Список литературы.....	142
4.2. Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из криволинейного канала с вихрями Дина.....	144
4.2.1. Введение.....	144
4.2.2. Методика проведения экспериментов	145
4.2.3. Результаты экспериментальных исследований	147
4.2.4. Обсуждение и анализ результатов экспериментов.....	153
4.2.5. Заключение	160
Глава 5. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от ориентации выходного сопла, начальных условий на срезе микросопла и способа ее воспламенения.....	163
5.1. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от ориентации выходного сопла	163
5.1.1. Введение	163
5.1.2. Параболический профиль скорости на срезе сопла ...	166
5.1.3. Анализ результатов исследований.....	171
5.1.4. «Ударный» профиль скорости на срезе сопла	175
5.1.5. Анализ результатов исследований.....	181
5.1.6. Заключение	183
5.1.7. Список литературы.....	187
5.2. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от начальных условий на срезе микросопла	190
5.2.1. Введение	190
5.2.2. Ударный профиль скорости на срезе сопла микроструи	192

5.2.3. Параболический профиль скорости на срезе сопла микроструи	195
5.2.4. Анализ и обсуждение результатов исследований.....	202
5.2.5. Заключение	205
5.2.6. Список литературы.....	206
5.3. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от способа ее воспламенения.....	208
5.3.1. Введение	208
5.3.2. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	211
5.3.3. Особенности сверхзвукового диффузионного горения микроструи водорода с образованием сверхзвуковых ячеек при ее воспламенении вдали от среза сопла	213
5.3.4. Идентификация сверхзвуковых ячеек	224
5.3.5. Заключение	225
5.3.6. Список литературы.....	226

Глава 6. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода.....	228
6.1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение	228
6.1.1. Введение.....	228
6.1.2. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	231
6.1.3. Особенности дозвукового диффузионного горения микроструи водорода и сверхзвуковое истечение микроструи воздуха с образованием сверхзвуковых ячеек.....	232
6.1.4. Температурный режим диффузионного горения круглой микроструи водорода.....	234
6.1.5. Результаты экспериментальных исследований диффузионного горения круглой микроструи водорода.....	238

6.1.6. Сравнение результатов экспериментальных исследований	252
6.1.7. Заключение	254
6.1.8. Список литературы.....	255
6.2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение	257
6.2.1. Введение.....	257
6.2.2. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	261
6.2.3. Результаты экспериментальных исследований диффузионного горения круглой микроструи водорода.....	262
6.2.4. Сравнение результатов экспериментальных исследований	274
6.2.5. Заключение	276
6.2.6. Список литературы.....	277

Глава 7. Экспериментальное исследование диффузионного горения микроструй водорода при до- и сверхзвуковой скорости	279
7.1. Введение	279
7.2. Диффузионное горение круглых микроструй водорода	281
7.2.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	281
7.2.2. Результаты экспериментов.....	283
7.3. Диффузионное горение плоской микроструи водорода	302
7.3.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	302
7.3.2. Результаты экспериментов.....	304
7.4. Заключение	319
7.5. Список литературы.....	320

Глава 8. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха, а также в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком.....	322
--	------------

8.1. Введение	322
8.2. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха	325
8.2.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	325
8.2.2. Результаты экспериментов	327
8.3. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком.....	334
8.3.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	334
8.3.2. Результаты экспериментов.....	336
8.4. Заключение	343
8.5. Список литературы.....	344

Глава 9. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха, а также водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения	346
9.1. Введение	346
9.2. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения.....	346
9.2.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	346
9.2.2. Результаты экспериментов.....	349
9.3. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения	356
9.3.1. Экспериментальное оборудование и процедура исследования	356
9.3.2. Результаты экспериментов.....	357
9.4. Заключение	361
9.5. Список литературы.....	362
Заключение	365