

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Нестационарный пульсирующий газовый разряд в
сверхзвуковых и дозвуковых воздушных потоках**

Выполнил студент 4 курса

423 группы

Гавриленко Максим Иванович

Научный руководитель

Шибков Валерий Михайлович

Москва

2021

1. Введение и цель работы

В настоящее время в российской и мировой науке все большую актуальность приобретают исследования в области сверхзвуковой плазменной аэродинамики, что связано с технологией создания новых видов высокоскоростных транспортных и космических систем. Для улучшения аэродинамических характеристик современных летательных аппаратов предлагается создавать на их несущих поверхностях плазменные образования. Эта технология позволяет управлять параметрами газового потока в пограничном слое летательного аппарата, снижать поверхностное трение, задерживать ламинарно-турбулентный переход, предотвращать отрыв и срыв потока с поверхности обтекаемого тела. Низкотемпературную газоразрядную плазму планируется применять также для быстрого объемного плазменно-стимулированного воспламенения топлива, управления процессом горения и его стабилизации при сверхзвуковых течениях в камерах сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

Для эффективного функционирования двигателя необходимо, чтобы скорость потока топливно-воздушной смеси в камере сгорания превышала сверхзвуковую скорость. Однако при таких скоростях трудно осуществить стабилизацию и полное сгорание топлива внутри камеры сгорания. Одним из новых решений данной проблемы является использование газовых разрядов с целью направленного воздействия на поток с помощью локального выделения в нем дополнительной энергии, способствующей полному сжиганию топлива в достаточно коротких камерах сгорания длиной $L \sim 0.5$ м. при умеренных температурах воздушно-углеводородной смеси $T \sim 1000$ К.

Целью работы является экспериментальное изучение процессов, протекающих в низкотемпературной газоразрядной плазме, создаваемой в дозвуковых и сверхзвуковых многокомпонентных химически активных потоках, для оптимизации использования разряда в плазменной аэродинамике.

В нашем случае для стабилизации горения топлива используется нестационарный продольно-поперечный разряд, создаваемый в высокоскоростных многокомпонентных химически активных потоках с помощью стационарного источника питания.

В качестве углеводородного топлива выбран пропан – газ, обладающий высокой удельной теплотой сгорания.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, состоящей из металлической барокамеры объемом 3 м^3 , ресивера высокого давления воздуха, системы для создания сверхзвукового потока, прямоугольного расширяющегося аэродинамического канала с присоединенным воздухопроводом и высоковольтного источника питания для создания газоразрядной плазмы. Разряд создавался в аэродинамическом канале переменного сечения, отношение выходного сечения к входному $S_2/S_1=12$.

Канал размещен внутри металлической барокамеры, давление воздуха в которой могло изменяться от 40 до 760 Торр. Основные эксперименты были проведены внутри открытой барокамеры при атмосферном давлении и давлении воздуха в ресивере компрессора 1.2–5 атм. Скорость дозвуковых (число Маха потока $M < 1$) и сверхзвуковых ($M = 1-2.5$) потоков изменялась от 100 м/с до 600 м/с. Для создания пульсирующего продольно-поперечного разряда без его дополнительной инициации в широком диапазоне скоростей потока применялся электродный узел специальной конфигурации. Минимальное расстояние между электродами изменялось от 0.1 мм до 0.3 мм.

В экспериментах воздушный поток существует в течение $t_0 = 2-3 \text{ с}$. В течение $t_1 = 1-2 \text{ с}$ создавался разряд с временной задержкой $\Delta t_1 = 0.4 \text{ с}$ по отношению к пуску воздуха. Инжекция пропана осуществлялась также в течение $t_2 = 1-2 \text{ с}$ с временной задержкой $\Delta t_2 = 0-0.3 \text{ с}$ по отношению к моменту времени включения разряда.

Возникающая при сверхзвуковом сгорании пропана сила тяги измеряется с помощью тензорезистивного датчика. Установка (аэродинамический канал и сопло Лавалья) подвешена на тонких нитях и имеет степень свободы движения вдоль оси канала. Усилие передается через непосредственный контакт датчика с каналом. Работа тензодатчика основана на измерении изменяющегося под действием нагрузки сопротивления тензорезистивного элемента.

Экспериментальные условия

- Высокоскоростной поток воздуха с числом маха $M=1-2$
- Массовый расход воздуха 50-105 г/с
- Массовый расход пропана 2-5 г/с
- Давление воздуха в разрядной камере 40-760 Торр

Параметры источника постоянного тока:

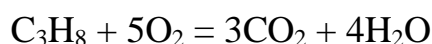
- Средняя мощность 1-20 кВт

- Разрядный ток 1-16 А
- Напряжение на разрядном промежутке 1-4,5 кВ
- Длительность импульса тока 0,1-2,0 с

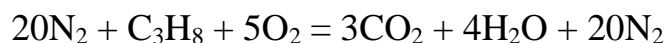
3. Теория

Стехиометрия

Стехиометрическое уравнение – уравнение, показывающее количественные соотношения реагентов и продуктов химической реакции. В нашем эксперименте происходит горение пропана:



Чтобы понять, какое количество пропана нужно подавать для наиболее эффективного и полного его сгорания, учтём, что горение пропана происходит в воздухе, поэтому в уравнении нужно с обеих сторон добавить одинаковое количество азота, учитывая примерное соотношение азота и кислорода в воздухе (4 к 1). Другие составляющие воздуха составляют малую часть, поэтому их в уравнении можно не учитывать.



При таком соотношении реагентов будет сгорать весь пропан.

Стехиометрическая горючая смесь – смесь окислителя и горючего, в которой окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления горючего. Стехиометрическая смесь обеспечивает полное сгорание топлива без остатка избыточного окислителя в продуктах горения.

Соотношение коэффициентов, при котором сгорает весь пропан без избытка кислорода, принято называть стехиометрическим. Если пропана будет меньше, смесь называется бедной. Если больше – богатой смесью, и тогда будет сгорать не всё топливо, часть его будет выветриваться и оседать на стенках. По данному уравнению составим стехиометрические отношения воздух/топливо по объёму и по массе, чтобы выяснить, сколько нужно подавать пропана на входе, чтобы горение было наиболее эффективным, а следовательно, чтобы получить наибольшую тягу.

Стехиометрическое отношение по объёму (для газов объёмное отношение совпадает с молярным):

$$L_V = \frac{n(\text{C}_3\text{H}_8)}{n(\text{N}_2) + n(\text{C}_3\text{H}_8) + n(\text{O}_2)} = \frac{1}{20 + 1 + 5} = 0.038 = 3.8\%$$

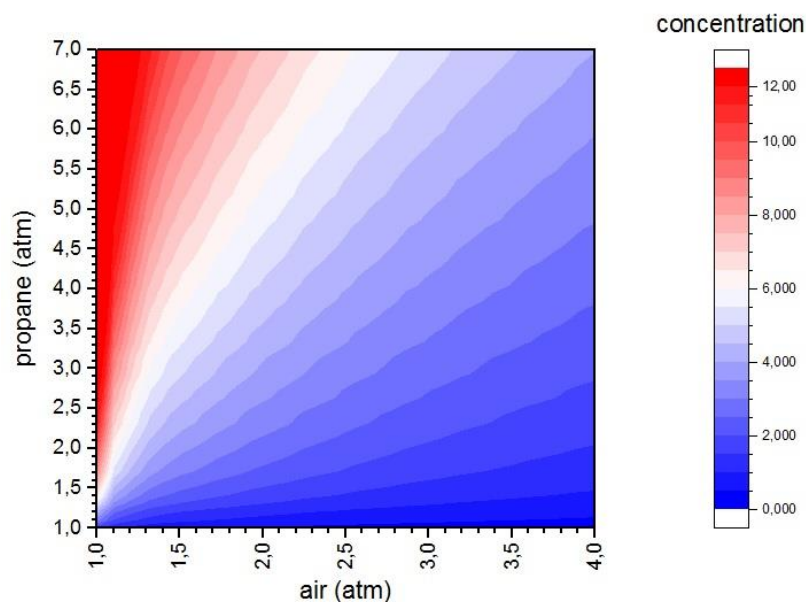
Чтобы рассчитать стехиометрию по массе, воспользуемся формулой $m = n * M$, где n – количество вещества из уравнения выше, M – молярная масса.

$$L_m = \frac{m(\text{C}_3\text{H}_8)}{m(\text{N}_2) + m(\text{C}_3\text{H}_8) + m(\text{O}_2)} = 0.058 = 5.8\%$$

Если учесть в уравнении другие составляющие воздуха, стехиометрические отношения примут вид:

$$L_V = 4\%, L_m = 6\%.$$

На основании приведенных рассуждений построена карта концентраций. По оси X отложены давления воздуха, по оси Y – давления пропана. Белый цвет соответствует стехиометрическому отношению $L_m = 6\%$, ниже – бедная смесь, выше – богатая.

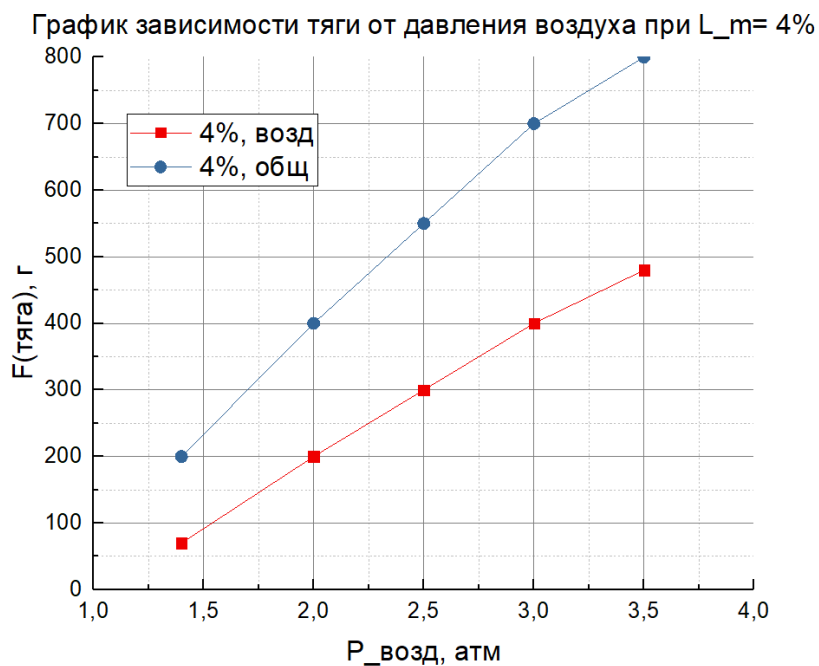


4. Экспериментальная часть

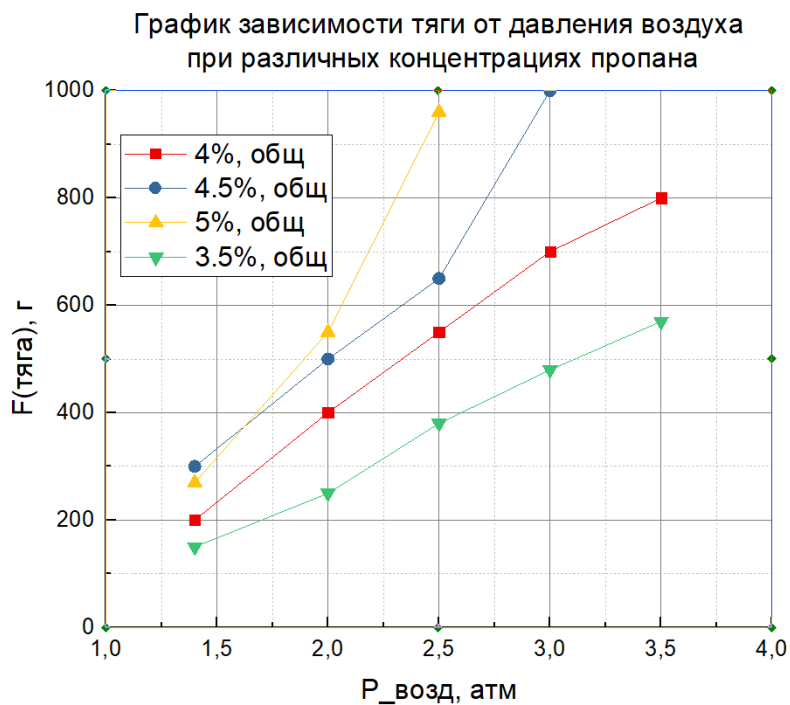
Воздух и пропан подаются с задержкой, поэтому в течение 1 пуска можно замерить тягу и на воздухе, и на воздухе с пропаном. При фиксированной концентрации пропана в пропан-воздушной смеси давление пропана из давления воздуха определяется однозначно, поэтому условимся по оси X откладывать давление воздуха.

Тяга на воздухе меньше тяги с пропаном, что подтверждается многочисленными измерениями, ниже приведён график зависимости тяги на

воздухе и на воздухе с пропаном от давления воздуха при концентрации пропана в потоке $L_m = 4\%$.



Построены графики зависимости общей тяги (пропан + воздух) при разных концентрациях пропана в потоке (3.5%, 4%, 4.5%, 5%). С ростом концентрации пропана в горючей смеси растёт и тяга, растёт она до тех пор, пока не достигнет стехиометрического отношения $L_m = 6\%$, после этого тяга снова падает. Полученные результаты соответствуют теории.



Также измерена тяга при закрытой металлической барокамере, из которой откачивался воздух, при разных давлениях внутри камеры и разных давлениях пропана и воздуха.

Давление воздуха, атм	Давление пропана, атм	Давление внутри камеры, Торр	Тяга, кг
2,4	5,8	70	4
4	5,8	100	6,3

В первом случае наблюдается стехиометрия, давление внутри камеры меньше, чем во втором случае, но при этом тяга больше во втором случае. Это объясняется тем, что во втором случае больше давление воздуха в ресивере и возрастает воздушная тяга, а вместе с ней и общая тяга.

5. Итоги работы

Проведено исследование плазменно-стимулированного горения сверхзвуковых и дозвуковых пропан-воздушных потоков. Построены графики зависимости тяги при использовании воздуха и горючей пропан-воздушной смеси. Для горючей смеси построены графики при различных концентрациях пропана в воздушном потоке. Показано, что тяга растёт при приближении концентрации пропана в воздушном потоке к стехиометрическому отношению, а также растёт с ростом давления воздуха при фиксированной концентрации пропана в смеси.

6. Список литературы

- 1) Г. Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика. Часть 1. 5-е издание, 1991, 600с.
- 2) В. М. Шибков, Л. В. Шибкова, А. А. Логунов // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2018
- 3) Велихов Е.П., Голубев В.С., Пашкин С.В. Тлеющий разряд в потоке газа // УФН. 1982. Т.137. вып.1. С.117.
- 4) Алферов В.И., Бушмин А.С. Электрический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха // ЖЭТФ. 1963. Т.44. №.6. С.1775.