

**О ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛОВОГО СЛЕДА
ОТ ОПТИЧЕСКОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАЗРЯДА
НА СИЛУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА**

Т.А. Киселева^{1,2}, А.А. Гольшев¹, В.И. Яковлев¹, А.М. Оришнич^{1,2}

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
630090, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия*

Проблема снижения аэродинамического сопротивления тел в высокоскоростном потоке газа относится к ключевым проблемам аэродинамики. Одним из методов ее решения являются активные воздействия непосредственно на поток, обтекающий тело [1-3]. Перспективным дистанционным способом воздействия является ввод энергии лазерного излучения [2-3] в поток, обеспечивающий оптический пробой воздуха. За областью энерговыделения в сверхзвуковом потоке образуется тепловой след [3], который влияет на структуру обтекания тела.

Целью представленной работы является исследование влияния теплового следа за оптическим пульсирующим разрядом (ОПР) на силу аэродинамического сопротивления тела при введении излучения лазера в перпендикулярном сверхзвуковому потоку воздуха направлении.

Экспериментальная установка включала в себя сверхзвуковую аэродинамическую установку МАУ-М [4] и импульсно-периодический CO₂-лазер [5]. Схема установки показана на рисунке.

Сверхзвуковой поток воздуха истекал из профилированного сопла ($d_c = 50$ мм, $M = 1.45$, $Re_1 = 1.4-3.8 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$) в затопленное пространство. Излучение лазера через линзу поступало на осевую линию сверхзвукового потока в перпендикулярном ему направлении. Средняя мощность излучения была равна 1.8 кВт, коэффициент поглощения энергии плазмой пробоя достигал 60%. С целью уменьшения требуемой для организации ОПР мощности лазера в область фокусировки лазерного излучения вводилась струя аргона соосно основному потоку. Модель в виде полусферы на цилиндре (диаметр модели $d_m = 7$ мм, длина 25 мм) устанавливалась по оси потока на различных расстояниях до места фокусировки излучения лазера (l). Модель монтировалась в корпус обтекателя тензочувствительных датчиков CAS VCL-1L.

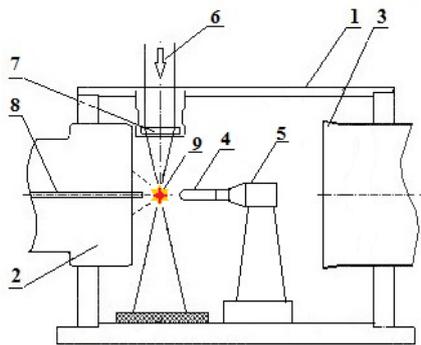


Схема проведения эксперимента.

1 – рабочая часть аэродинамической трубы, 2 - сопло, 3 - диффузор, 4 - модель, 5 – аэродинамические веса,
6 – излучение лазера, 7- фокусирующая линза, 8 – трубка для выдува аргона, 9 – ОПР.

Влияние теплового следа от ОНР на силу аэродинамического сопротивления модели

f , кГц	$F_{Ar+лаз}/F_{Ar}$		
	$k = 3$	$k = 4.5$	$k = 6$
50	1	0.968±0.004	0.958±0.004
70	0.924±0.004	0.930±0.004	0.946±0.004
80	0.854±0.004	0.910±0.004	0.948±0.004
90	0.849±0.004	0.912±0.003	0.942±0.003

В течение каждого эксперимента проводились измерения силы аэродинамического сопротивления, действующей на модель, в основном потоке, в потоке с дозвуковой струей аргона F_{Ar} , а также при организации ОНР в потоке с дозвуковой струей аргона $F_{Ar+лаз}$.

В таблице приведены результаты экспериментов в виде зависимости относительной аэродинамической силы, действующей на модель при введении энергии лазерного излучения, от частоты следования лазерных импульсов (f). Результаты представлены для различных расстояний по оси потока между моделью и ОНР (l), отнесенных к диаметру модели $k = l/d_m$. Поскольку выдув дозвуковой струи аргона также оказывал влияние на обтекание модели, для выявления влияния только теплового следа от ОНР, измеренная сила $F_{Ar+лаз}$ нормировалась на величину аэродинамической силы F_{Ar} , измеренную в том же пуске аэродинамической установки.

Из таблицы видно, что при увеличении частоты следования лазерных импульсов снижение аэродинамической силы увеличивается. Этот эффект можно объяснить тем, что поскольку газодинамические параметры в области низкой плотности, образующейся от каждого оптического разряда, слабо зависят от энергии в одном импульсе (которая в свою очередь зависит от f) [3], то увеличение количества импульсов приводит к усилению воздействия.

При удалении от места образования области низкой плотности деформируются и разрушаются [3], что приводит к приближению параметров теплового следа к параметрам невозмущенного потока. Поэтому при удалении модели от области формирования оптического пробоя снижение аэродинамического сопротивления уменьшается.

Также по результатам экспериментов видно, что при удалении модели на расстояния $k = 6$ снижение силы аэродинамического сопротивления составляет ~ 5% и имеет слабую зависимость от частоты f . При приближении модели к области ОНР влияние частоты усиливается и достигает 15% при удалении $k = 3$ при максимальной частоте $f = 90$ кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-08-00526, 2016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Георгиевский П.Ю.** Управление сверхзвуковым обтеканием тел при помощи локализованного подвода энергии в набегающий поток: автореф. дис. ...канд. физ. - мат. наук., Москва, 2003.
2. **Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Иванченко А.И., Яковлев В.И.** Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда // ДАН. 1996. Т.351. №3. С. 339-340.
3. **Т. А. Бобарыкина, А. Н. Малов, А. М. Оришнич, В. Ф. Чиркашенко, В. И. Яковлев.** Оптический разряд с поглощением импульсно-периодического излучения CO₂-лазера в сверхзвуковом потоке воздуха: волновая структура и условие квазистационарности // Квантовая электроника. 2014. Т 44. No.9. С. 836-840.
4. **Звегинцев В.И.** Импульсная аэродинамическая труба с числом Маха потока от 2 до 7 / ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1982.
5. **Малов А. Н., Оришнич А. М., Шулятьев В. Б.** Мощный импульсно-периодический CO₂-лазер с механической модуляцией добротности и его применение для исследований в аэродинамических установках // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. No. 11. С. 1027-1032.