

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быхало А.И., Жужукало Е.В. и др. Иницирование тэна мощным лазерным излучением // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 4. – С. 110–119.
2. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным импульсом // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 26. – № 1. – С. 3–9.
3. Карабанов Ю.Ф., Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ // Горение конденсированных систем: сб. статей / Институт химической физики АН СССР; под ред. А.Г. Мержанова. – Черногловка: ОИХФ, 1977. – С. 5–12.
4. Таржанов В.И., Зинченко А.Д. и др. Лазерное иницирование тэна // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 4. – С. 114–119.
5. Ципилев В.П. Лазерное иницирование тэна // Физико-химические процессы в неорганических материалах: Тез. докл. VIII Междунар. конф. – Кемерово, 2001. – С. 113–114.
6. Адуев Б.П., Белокуров Г.М. и др. Исследование чувствительности механической смеси тетранитропентаэритрита и наночастиц Ni-C к иницированию взрыва импульсами лазера // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45. – № 1. – С. 68–72.
7. Александров Е.И., Ципилев В.П. Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры // Известия вузов. Физика. – 1988. – Т. 52. – № 10. – С. 23–29.
8. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. К вопросу о кинетике и механизме взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42. – № 1. – С. 106–119.
9. Александров Е.И., Вознюк А.Г. Иницирование азидов свинца лазерным излучением // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14. – № 4. – С. 86–91.
10. Ципилев В.П., Лисицын В.М., Даммам Ж., Малис Д. Иницирование азидов тяжелых металлов лазерным импульсом в УФ-области спектра // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 8/2. – С. 320–323.
11. Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П., Яковлев А.Н. К вопросу о предвзрывных явлениях, порогах и критериях иницирования азидов тяжелых металлов внешним импульсом // Энергетические конденсированные системы: Матер. III Всеросс. конф. – Черногловка, 2006. – С. 77–79.
12. Зинченко А.Д., Погребов А.И., Таржанов В.И., Токарев Б.Б. Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 5. – С. 80–87.
13. Ципилев В.П., Морозова Е.Ю. Зажигание конденсированного вещества лазерным импульсом в области длин волн собственного поглощения // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 8/2. – С. 324–326.
14. Александров Е.И., Ципилев В.П. Исследование влияния длительности возбуждающего импульса на чувствительность азидов свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20. – № 6. – С. 104–109.
15. Александров Е.И., Сидонский О.Б., Ципилев В.П. Влияние выгорания в окрестности поглощающих включений на процесс лазерного зажигания конденсированной среды // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27. – № 3. – С. 7–12.

Поступила 06.10.2010 г.

УДК 629.1.015.3:535.21.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ВОЗДУХА С ПОДВОДОМ ЭНЕРГИИ ОТ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

А.Н. Малов, А.М. Оришич, В.М. Фомин, Д.А. Внучков, Д.Г. Наливайченко, В.Ф. Чиркашенко

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: malex@ltam.nsc.ru

Проведено исследование процессов энергетического управления параметрами сверхзвукового потока воздуха в условиях реального газодинамического обтекания аэродинамической модели. Исследования выполнены с использованием впервые созданного квазистационарного оптического разряда в условиях масштабной аэродинамической установки. Показано, что при взаимодействии теплового следа от зоны оптического разряда с головной ударной волной, генерируемой моделью, наблюдается заметное изменение структуры течения за падающей ударной волной от модели в области взаимодействия ее с тепловым следом, создаваемым оптическим пробоем.

Ключевые слова:

Импульсно-периодический CO₂-лазер, лазер с модуляцией добротности, оптический пробой воздуха, сверхзвуковой поток, ударная волна, звуковой удар.

Key words:

High power repetition rate CO₂-laser, Q-switching laser, supersonic air stream, optical breakdown, shock wave, sonic boom.

Введение

Одна из проблем создания и применения пассажирских сверхзвуковых самолетов второго поколения связана с решением задачи звукового удара. При полете самолета в атмосфере со скоростью, превышающей скорость распространения звука, генерируются возмущения, которые в виде удар-

ных волн (УВ) распространяются в пространстве. За головной УВ в результате наложения возмущений скачкообразно увеличивается давление, температура и плотность. При удалении от самолета в результате нелинейных эффектов (изменение скорости звука и зависимость скорости распространения возмущений от их амплитуды) возму-

шенное течение трансформируется в ударные волны, воспринимаемые наблюдателем на поверхности земли (в зависимости от размера самолета и высоты полета) в виде двух или одного отдаленных взрывов — звукового удара.

Существующее экологическое ограничение на уровень шума обуславливают необходимость проведения исследований по снижению интенсивности звукового удара.

Для решения этой проблемы помимо традиционных методов, связанных с изменением формы летательного аппарата, проводятся исследования по снижению уровня звукового удара путем активного воздействия на формирование возмущенного течения с помощью подвода массы, энергии и отвода энергии вблизи летательного аппарата [1–5].

В работе [6] на основании численного моделирования процесса взаимодействия плоской ударной волны с тепловым слоем, а также аналитического анализа в рамках теории коротких волн показано, что в зависимости от параметров падающей ударной волны и теплового слоя интенсивность прошедшей тепловой слой ударной волны может как уменьшаться, так и увеличиваться. Для проведения экспериментальных исследований в этом случае должен быть выбран способ подвода энергии в сверхзвуковой поток воздуха.

Одним из способов дистанционного нагрева воздуха является применение энергии лазерного излучения. Зона энерговода определяется оптическим пробоем воздуха в нужной точке и созданием условий для эффективного поглощения энергии лазерного излучения в созданной плазме. Однако для формирования оптического пробоя в сверхзвуковом потоке воздуха требуется обеспечить высокую интенсивность лазерного излучения ($\sim 10^9$ Вт/см²) за время ~ 100 нс. Квазистационарный ввод энергии лазерного излучения с высоким значением средней мощности, сравнимым с энтальпией набегающего потока (единицы и десятки кВт) в настоящее время можно реализовать условиях повторяющихся импульсов с высокой частотой следования (80...100 кГц). При этом в сверхзвуковом потоке формируются периодические сгустки плазмы (плазмоиды) с температурой 20...30 тыс. град. За плазмоидами формируется тепловой след, влияние которого на структуру ударных волн может привести к снижению звукового удара.

Имеется ряд публикаций [7–9], касающихся создания квазистационарного оптического разряда в сверхзвуковом газовом потоке и управления аэродинамическим сопротивлением тела с помощью такого разряда. Однако исследования [9] выполнены на малоразмерных струях, что снижает их достоверность, а результаты [7, 8] получены в среде аргона, что затрудняет их использование для анализа газодинамических процессов в реальных условиях атмосферы Земли.

Таким образом, целенаправленное исследование структуры сверхзвуковых течений воздуха при обтекании аэродинамических моделей с дистан-

ционным подводом энергии от лазерного источника большой мощности в условиях полноразмерного сверхзвукового потока является актуальным и новым. Данная работа направлена на экспериментальное исследование возможности снижения интенсивности звукового удара путем воздействия на возмущенное течение вблизи летательного аппарата слоем нагретого газа.

Экспериментальная установка

Для выполнения экспериментов на основе мощного технологического лазера [10] создан импульсно-периодический CO₂-лазер с механической модуляцией добротности со средней мощностью генерации до 4 кВт, частотой следования импульсов до 80 кГц и импульсной мощностью до 150 кВт [9]. Такой способ модуляции добротности применительно к мощному CO₂-лазеру описан ранее [7].

Сверхзвуковое обтекание моделировалось в малоразмерной аэродинамической трубе (МАУ), позволяющей реализовать параметры потока близкие к натурным в диапазоне чисел Маха $M=2...7$. С помощью быстродействующего клапана организуется импульсное истечение запасенного в баллонах сжатого воздуха в газодинамический тракт установки. При запуске установки на выходе из профилированного сопла диаметром 100 мм реализуется квазистационарный сверхзвуковой поток.

Схема проведения экспериментов приведена на рис 1.

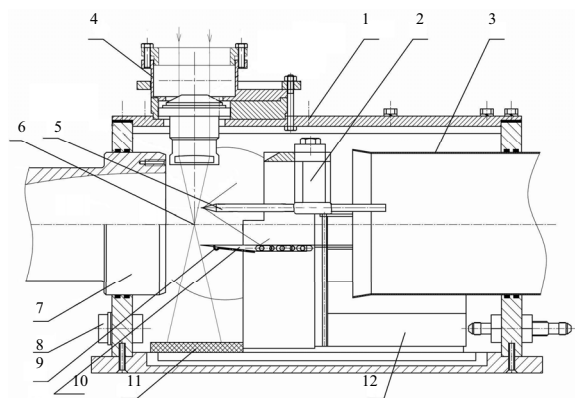


Рис. 1. Схема проведения эксперимента в аэродинамической установке МАУ: 1) рабочая часть; 2) кронштейн; 3) диффузор; 4) устройство ввода излучения; 5) модель; 6) фокус; 7) сопло; 8) электрический разъем; 9) дренажная трасса; 10) измерительная пластина; 11) поглотитель излучения; 12) блок датчиков давления

Излучение CO₂-лазера вводилось в рабочий поток в поперечном к нему направлении (на рисунке показано стрелками). Излучение поступает в устройство ввода — 4, установленное герметично на верхней стенке рабочей части МАУ. Устройство включает в себя диафрагму и короткофокусную линзу (фокусное расстояние 63 мм), установленную в оправке. Резьбовое соединение оправки с корпусом устройства позволяет изменять поло-

жение линзы в вертикальном направлении к оси сопла в пределах характеристического ромба сверхзвукового потока. На нижней стенке рабочей части установлен поглотитель излучения – 8, изготовленный из графитовой пластины. Модель – 4 и измерительная дренированная пластина – 5 установлены на специальном устройстве, основные элементы которого расположены вне рабочего потока. Учитывая малое время существования рабочего режима, для обеспечения минимальной инерционности установления давления в пневмотрассах датчики давления располагаются в рабочей камере. Сигналы с датчиков давления – 6 по кабельным линиям через герметичные разъемы поступают на вход регистрирующей аппаратуры SCP-3200.

Для проведения визуальных наблюдений процесса формирования плазмы в сверхзвуковом потоке и создаваемого ей теплового следа, а также взаимодействия следа с головной ударной волной, генерируемой моделью, установка оснащена системой оптической диагностики. Система включает оптическую приставку к теневым приборам на базе адаптивных визуализирующих транспарантов в комплекте с коллиматором на базе телескопов

ТАЛ-100R и скоростную видеокамеру с временем экспозиции ~ 1 мс [11]. Применяемый источник света – непрерывный лазер с диодной накачкой с длиной волны 532 нм.

Экспериментальные результаты

1. Методические исследования по обеспечению параметров потока

Исследования по обеспечению параметров потока, создаваемого МАУ, производились применительно к оптическим и дренажным измерениям в условиях энергоподвода в рабочий поток. Определены режимы, обеспечивающие время существования квазистационарного сверхзвукового потока не менее 1 с при обеспечении статического давления в потоке, достаточного для образования в нем плазмы сфокусированным пульсирующим излучением CO_2 -лазера в диапазоне его энергетических параметров. На рис. 2 показаны типовые зависимости изменения в процессе пуска полного давления потока (рис. 2, а) и статического давления на срезе сопла (рис. 2, б) при сформированной в потоке плазме ($N_{\text{ср}}=3$ кВт, $f=50$ кГц), здесь $N_{\text{ср}}$ – средняя мощность генерации; f – частота следования импульсов. Время существования расчетного

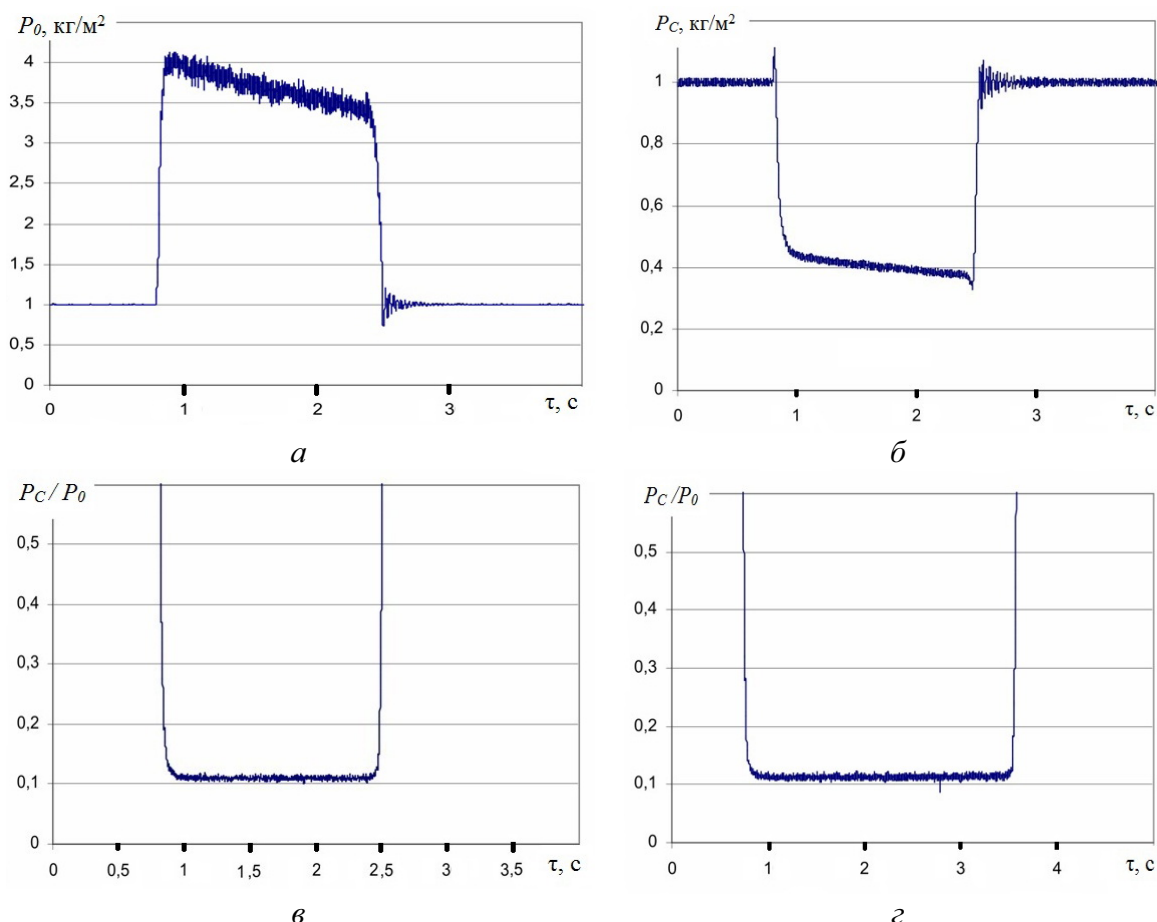


Рис. 2. Изменение параметров потока, создаваемого аэродинамической установкой МАУ в процессе эксперимента: а–в) с подводом энергии от пульсирующего разряда; г) без подвода энергии; а – полное давление потока; б – статическое давление потока на срезе сопла; в, г – отношение статического давления на срезе сопла к полному давлению потока

режима определяется интервалом времени, в течение которого обеспечивается постоянное отношение статического и полного давлений (рис. 2, в). В данном случае за 1,5 с реализован поток с числом $M=2,08$. Продолжительность режима без подвода энергии в поток при прочих равных условиях (рис. 2, г) увеличивается до 2,6 с, что указывает на существенное эффективное загромождение потока в результате подвода энергии.

2. Исследования предельных энергетических характеристик лазера в непрерывном и импульсно-периодическом режимах

В разработке используется лазер с модулированной добротностью (Q-switched CO₂-laser). Модуляция добротности производится за счет вращения металлического диска со щелями (либо отверстиями), установленного внутри резонатора. Расположение щелей на диске таково, что они при вращении диска периодически пересекают оптическую ось резонатора и открывают (включают) и закрывают (выключают) резонатор.

Внешний вид узла модуляции изображен на рис. 3. На переднем плане располагается диск со щелями. Особенностью конструкции является то, что узел модуляции расположен внутри рабочего объема лазера, и установка может рассматриваться как мощный технологический импульсно-периодический лазер.

Формирование импульса генерации объясняется процессом включения добротности и происходит следующим образом. За время между импульсами генерации, когда диск перекрывает ось резонатора, а через активную среду течет ток накачки, происходит возбуждение верхнего лазерного уровня, спонтанная релаксация нижнего лазерного уровня и аккумуляция на лазерном переходе энергии электрического разряда. При открывании оси резонатора и включении процесса генерации происходит формирование излучения в соответствии

с новой, более интенсивной инверсной заселенностью по сравнению со стационарным ее значением.

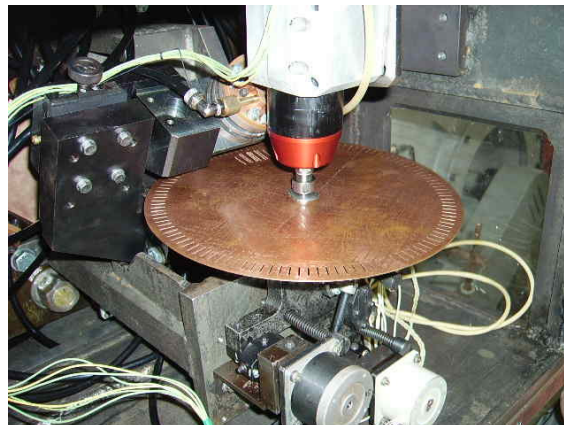
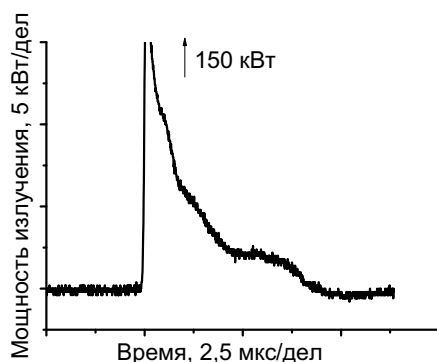


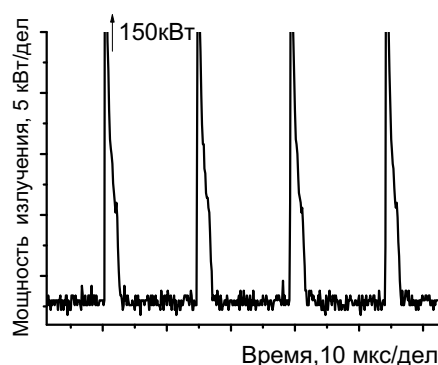
Рис. 3. Внешний вид узла модуляции

Характерные осциллограммы импульсов генерации показаны на рис. 4. Из рис. 4, а, видно, что импульсная мощность достигает уровня ~150 кВт при длительности пика ≤ 100 нс и полной длительности излучения ≥ 5 мкс в квазистационарной фазе (плато) с мощностью, приблизительно соответствующей мощности непрерывного режима. Система модуляции добротности позволяет изменять в широком диапазоне частоту следования импульсов, скважность, форму импульса генерации за счет изменения частоты вращения диска, ширины щели, количества щелей и состава смеси рабочих газов. В работе используются диски с количеством щелей 40, 120, 300, 400, что позволило получить максимальную частоту следования импульсов до 80 кГц.

На рис. 5, 6 приведены зависимости средней мощности генерации и КПД от мощности разряда для разработанного лазера, демонстрирующие высокие генерационные характеристики импульсно-периодического режима, практически близкие непрерывному.



а



б

Рис. 4. Осциллограммы генерации. Форма: а) отдельного импульса; б) периодического процесса

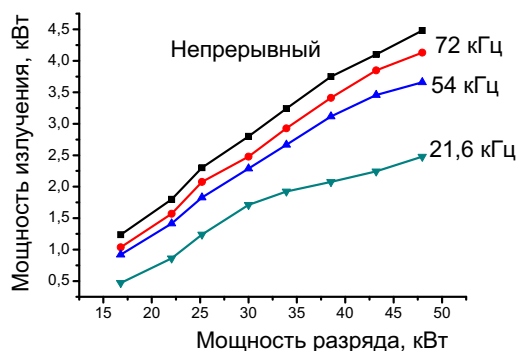


Рис. 5. Зависимости мощности генерации лазера от мощности разряда для непрерывного и импульсно-периодического режимов

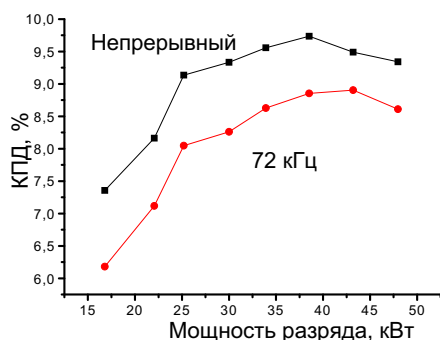


Рис. 6. Зависимости КПД лазера от мощности разряда для непрерывного и импульсно-периодического режимов

3. Исследование пробоя сверхзвукового потока

Фотография сверхзвукового потока с квазистационарным оптическим пробоем приведена на рис. 7. Динамика развития пробоя демонстрируется осциллограммами, рис. 8. Видно, что при достижении мощности лазера 0,6...0,7 от максимальной величины наблюдается неустойчивый пробой, который стабилизируется при дальнейшем росте мощности. При уменьшении мощности лазера свечение плазмы исчезает. Надо заметить, что при поперечном (относительно потока) вводе излучения процесс пробоя сверхзвукового воздушного потока происходит сложным образом и требует специальных исследований.

На рис. 9 показан теневой снимок оптического разряда в сверхзвуковом потоке ($M=2,08$, $f=54$ кГц, $N_{cp}=3,2$ кВт). Перед областью оптического разряда формируется головная ударная волна, как от затупленного твердого тела.

За плазмой наблюдается тепловой след, конфигурация которого немонотонно изменяется вниз по потоку. Наблюдаемый максимальный поперечный размер плазмы составляет 5...6 мм.

Проведены исследования по определению порога оптического пробоя воздуха сверхзвукового потока ($M=2$) в зависимости от частоты модуляции при средней мощности излучения. Показано, что устойчивый оптический пробой при частоте модуляции 20 кГц и средней мощности 2,7 кВт реализу-

ется при статическом давлении сверхзвукового потока не менее 0,032 МПа. При частоте модуляции 54 кГц и средней мощности 3,2 кВт устойчивый пробой наблюдался при увеличении статического давления до 0,037 МПа. При частоте модуляции 75 кГц и средней мощности 3,5 кВт при максимально обеспечиваемом установкой МАУ статическом давлении 0,043 МПа пробой не реализован.

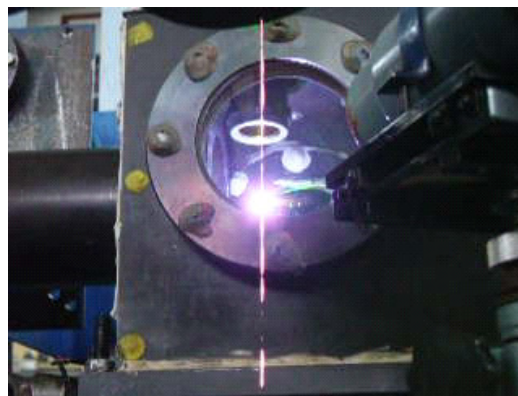


Рис. 7. Фотография сверхзвукового потока с оптическим пробоем

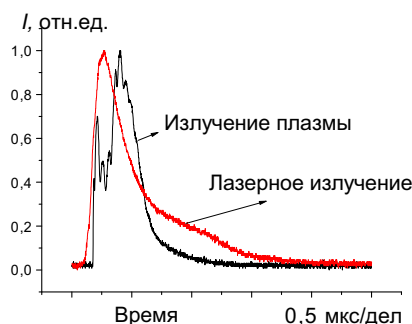


Рис. 8. Осциллограммы свечения плазмы оптического разряда и лазерного излучения

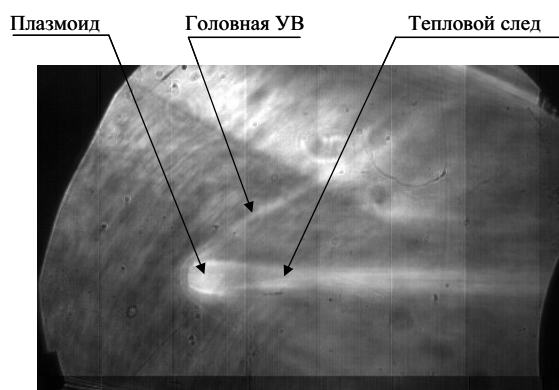
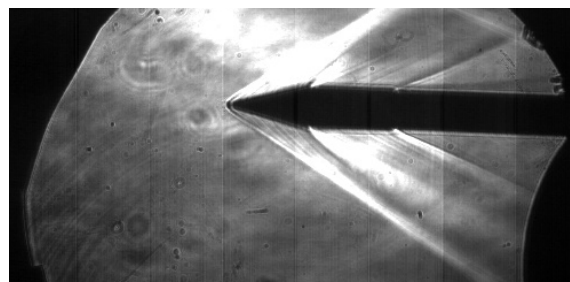


Рис. 9. Теневой снимок обтекания изолированного плазмоида сверхзвуковым потоком воздуха

На рис. 10, а, представлен теневой снимок структуры течения при взаимодействии теплового следа, формируемого областью оптического пробоя пульсирующим лазерным излучением ($N_{cp}=3,2$ кВт, $f=50$ кГц), с возмущенным потоком,



а



б

Рис. 10. Теневой снимок структуры течения при обтекании сверхзвуковым потоком ($M=2,08$; $Re = 4 \cdot 10^7$) модели в виде конуса на цилиндре: а) с энергоподводом; б) без энергоподвода

за головной УВ, генерируемой моделью в виде кругового конуса на цилиндре ($\beta_k=15^\circ$, $d_k=7$ мм). На рис. 10, б, для сравнения показано обтекание этой модели без энергоподвода.

В области взаимодействия головной УВ с тепловым слоем формируется нестационарное течение с заметным изменением структуры потока (рис. 10, б). Возмущенный поток за головной УВ при входе в тепловой слой переориентируется по направлению набегающего потока. Наблюдается прошедшая тепловой слой УВ, наклон которой (определяющий ее интенсивность) при покадровом рассмотрении заметно уменьшается вплоть до исчезновения на отдельных кадрах. Полученные результаты указывают на уменьшение интенсивности головной УВ при взаимодействии ее с тепловым слоем.

Выводы

1. На базе мощного CO_2 -лазера, обеспечивающего импульсно-периодический режим излучения,

и полноразмерной сверхзвуковой аэродинамической трубы создан экспериментальный комплекс для проведения исследований по управлению процессом обтекания путем локального энергоподвода.

2. Впервые в сверхзвуковом воздушном потоке исследовано энергетическое воздействие на структуру течения за счет организации квазистационарного оптического разряда.
3. По результатам оптических наблюдений показано заметное изменение структуры нестационарного течения в области взаимодействия головной ударной волны от модели с тепловым следом, генерируемым областью оптического разряда, указывающее на уменьшение интенсивности прошедшей тепловой слой ударной волны.

Работа была представлена на Международной конференции AMPL-2009 (Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул) с 14 по 18 сентября 2009 г., г. Томск, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 07–01–12040-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин В.М., Чиркашенко В.Ф., Волков В.Ф. Исследование проблемы звукового удара в ИТПМ СО РАН // Проблемы современной механики. – М.: Омега-Л, 2008. – 639 с.
2. Wlezien R., Veitch L. Quiet supersonic platform program // AIAA Paper. – 2002. – 2002–0143. – 17 р.
3. Гаранин А.Ф., Третьяков П.К., Чиркашенко В.Ф., Юдинцев Ю.Н. Управление параметрами ударных волн путем подвода массы и энергии // Известия РАН. Сер. Механика жидкости и газа. – 2001. – № 5. – С. 186–193.
4. Фомин В.М., Чиркашенко В.Ф., Волков В.Ф., Харитонов А.М. Управление уровнем звукового удара, создаваемого летательным аппаратом, путем криогенного воздействия на процесс обтекания. 1. Охлаждение поверхности летательного аппарата // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49. – № 6 (292). – С. 88–98.
5. Фомин В.М., Чиркашенко В.Ф., Волков В.Ф., Харитонов А.М. Управление уровнем звукового удара, создаваемого летательным аппаратом, путем криогенного воздействия на процесс обтекания. 2. Распределенный выдув переохлажденного газа с поверхности летательного аппарата // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 2 (294). – С. 136–144.
6. Охитин В.Н., Меньшаков С.С. О защитных свойствах слоя горячего воздуха // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43. – № 4. – С. 87–97.
7. Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Пономаренко А.Г. Импульсно-периодический режим модулированной добротности CO_2 лазера средней мощности 2 кВт и пиковой до 500 кВт // XI Conference on Laser Optics. – St. Petersburg, Russia, June 30 – July 4. – 2003. – Тезисы докладов. – СПб., 1993. – С. 130.
8. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н. и др. Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда // Доклады РАН. – 1996. – Т. 351. – № 3. – С. 339–340.
9. Malov A.N., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. High Power repetition Rate Q-switcher CO_2 -Laser and its Application to Study the Optical Breakdown in a Supersonic Air Stream // XVII Intern. Symp. on Gas Flow and Chemical Laser & High Power Laser: Proc. of SPIE. – Lisbon, Portugal, 2008. – V. 7131. – P. 71311P1–71311P7.
10. Афонин Ю.В., Голышев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Филев В.Ф., Печурин В.А., Шулятьев В.Б. Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO_2 лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 4. – С. 307–309.
11. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Павлов А.А., Смирнов А.Л., Павлов А.А., Голубев М.П. Газодинамические эффекты взаимодействия неподвижного оптического пульсирующего разряда с газом // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 1. – С. 82–87.

Поступила 28.05.2010 г.