

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

© 2022 г. И. А. Маслобоев^{a,b,*}, В. П. Фомичев^a,
А. Б. Шевченко^a, М. А. Ядренкин^a

^a Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

^b Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

*e-mail hawkeye90@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 22.11.2021 г.

Принята к публикации 27.11.2021 г.

Описан магнитогидродинамический (м.г.д.) стенд, созданный на основе ударной трубы. Отличительной особенностью данной установки является наличие системы генерации магнитного поля с индукцией до 2.5 Тл и устройств ионизации потока (электронная пушка, генераторы тока), что позволяет решать широкий круг задач магнитоплазменной аэродинамики. Особенности конструкции м.г.д.-стенда позволяют моделировать м.г.д.-воздействие на структуру потока при обтекании исследуемых тел в условиях высокоскоростного полета в атмосфере Земли при числах Маха потока $M = 6–12$. Рассмотрены основные используемые на стенде экспериментальные методики. Представлены примеры результатов исследования м.г.д.-эффектов, полученных на данной установке.

DOI: 10.31857/S003281622202015X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не потеряли своей актуальности исследования, направленные на изучение новых методов и способов управления высокоскоростными газовыми течениями путем локализованного подвода энергии в набегающий поток или с помощью магнитогидродинамического (м.г.д.) воздействия на ионизованные потоки газа в присутствии электрических и магнитных полей. Для проведения аэрофизического эксперимента с применением систем генерации сильных магнитных полей и внешней ионизации потока газа требуется адаптированная по размерам и параметрам аэродинамическая установка. Одним из наиболее простых путей создания экспериментального комплекса для такого рода исследований является использование техники ударных труб [1]. В ударной трубе происходят сжатие и нагрев рабочего газа за фронтом ударной волны. Постоянство параметров рабочего газа за отраженной ударной волной в форкамере сверхзвукового сопла позволяет получать стабильный режим истечения газа в рабочей камере установки для проведения различных газодинамических исследований [2]. Несомненным преимуществом техники ударных труб является возможность использования любых газов и газовых смесей для моделирования высокоско-

ростных потоков в широком диапазоне параметров. Однако ввиду кратковременности рабочего процесса данный подход предъявляет высокие требования к работе скоростных и высокоточных систем регистрации и измерения параметров течения. При длине ударной трубы несколько метров характерный масштаб времени квазистационарного течения газа на срезе сопла составляет порядка 1 мс. Использование современного быстродействующего оборудования и экспериментальных методов регистрации параметров высокоскоростного потока позволяет решить указанные выше проблемы.

В литературных источниках имеются примеры экспериментальных м.г.д.-стендов на основе ударных труб, предназначенных для решения фундаментальных и прикладных задач магнитоплазменной аэродинамики. Отличительной особенностью таких устройств является наличие системы генерации магнитного поля в исследуемой области течения. Например, в работе [3] представлены результаты исследований м.г.д.-взаимодействия на установке, способной моделировать сверхзвуковые ($M = 3–4$) потоки неравновесной плазмы в магнитном поле с величиной индукции до 2 Тл. Ионизация потока осуществлялась с помощью высоковольтного короткоим-

пульсного высокочастотного плазменного генератора.

В работе [4] исследование м.г.д.-взаимодействия проводилось на ударной трубе с числом Маха потока $M = 1.5$ в рабочей камере. В качестве рабочего газа использовался гелий с добавлением цезия. Магнитное поле с индукцией 2.3 Тл создавалось с помощью электромагнита. Для создания ионизированной области потока использовалась разрядная секция, которая представляла собой 19 пар электродов круглого сечения диаметром 5 мм, смонтированных заподлицо в стенку рабочей камеры. Расстояние между парами электродов увеличивалось с 45 мм для первой пары до 48.5 мм для последней. В качестве источников энергии для электродов использовались 19 отдельных конденсаторов.

В работе [5] описаны эксперименты, которые проводились на установке, созданной также на основе ударной трубы, рабочая камера установки представляла собой сверхзвуковое прямоугольное сопло. В верхние и нижние стенки сопла был смонтирован набор латунных электродов для генерации газовых разрядов. Установка дополнительно включала в себя систему генерации газового разряда на основе каскада длинных линий, рассчитанных на организацию токовых импульсов в потоке длительностью до 600 мкс, а также систему организации импульсного однородного поперечного магнитного поля во всей области течения с магнитной индукцией до 1.5 Тл и длительностью квазистационарной области воздействия около 600 мкс. В качестве рабочего газа для исследований использовался инертный газ ксенон. Для исследований был выбран режим работы ударной трубы, характеризующийся наличием сшитой контактной поверхности потока. Давление толкающего газа – водорода – 2.1 МПа, давление водорода в камере низкого давления 3.0 кПа, число Маха ударной волны в ударной трубе $M_s = 8$.

Представленные установки были спроектированы, как правило, для решения узкого круга задач, имели малые размеры сечения рабочей части (не более 55×80 мм²) и исследуемых моделей (≤ 40 мм). В указанных работах было установлено, что можно изменять положение ударной волны, образующейся при обтекании моделей, как в сторону удаления от модели, так и в сторону приближения волны к телу, меняя направление газоразрядного тока и параметр м.г.д.-воздействия.

В данной статье рассмотрена работа м.г.д.-стенда, созданного на основе ударной трубы в ИТПМ СО РАН и предназначенного для моделирования ионизированных высокоскоростных газовых течений в присутствии электрических и магнитных полей, а также представлены примеры

проведения различных исследований на данной установке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Экспериментальный м.г.д.-стенд ИТПМ СО РАН был создан для решения широкого круга задач магнитоплазменной аэродинамики в высокоскоростных газовых потоках. Установка позволяет реализовать условия полета в атмосфере Земли на высоте 30–60 км над уровнем моря с числом Маха $M = 6–12$.

Экспериментальный стенд состоит из следующих частей:

- 1) импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы,
- 2) магнитной системы,
- 3) системы ионизации газовых потоков,
- 4) диагностического комплекса (оптической шлирен-системы, высокоскоростных средств регистрации параметров потока и плазмы, устройств синхронизации управляющих импульсов).

Особенности работы импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы

Схема м.г.д.-стенда и общий вид установки представлены на рис. 1. Отличительной особенностью импульсной аэродинамической установки на основе ударной трубы является принцип реализации параметров в форкамере сверхзвукового сопла, основанный на сжатии рабочего газа за отраженной ударной волной. Используемая ударная труба состоит из канала низкого давления (к.н.д.) и камеры высокого давления (к.в.д.), разделенных стальной диафрагмой. Длина к.н.д. составляет 7 м, внутренний диаметр канала – 76 мм, соответственно объем канала ~ 30 л. Камера высокого давления представляет собой баллон диаметром 180 мм с объемом 20 л, по оси симметрии которого расположен электрод для электродугового подогрева толкающего газа. В аэродинамических исследованиях в к.н.д. использовался воздух, а в к.в.д. – гелий.

Повышение давления и температуры толкающего газа в к.в.д. осуществляется подводом энергии в форме импульсного электродугового разряда между стенкой к.в.д. и изолированным от нее центральным электродом. Последний соединен с конденсаторной батареей общей емкостью 36 мФ и напряжением до 3 кВ. Электродуговой разряд инициируется инжекцией плазмы в область минимального зазора между электродом и корпусом к.в.д. с помощью инжектора, который встроен в электрод и имеет отдельный источник питания. Измерения тока и напряжения на разрядном промежутке показали, что энергия электрического разряда составляет обычно $W = 40–60$ кДж при

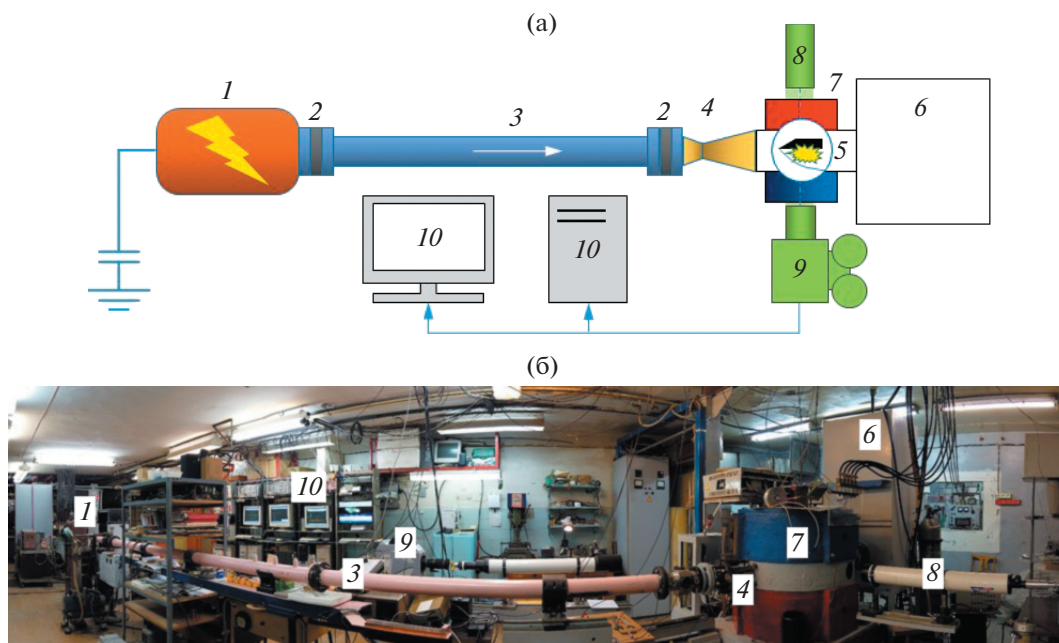


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) м.г.д.-стенда: 1 – камера высокого давления, 2 – диафрагма, 3 – канал низкого давления, 4 – сверхзвуковое профилированное сопло, 5 – рабочая камера, 6 – ресивер (вакуумный объем), 7 – магнитная система, 8 – оптическая система, 9 – высокоскоростная камера, 10 – диагностическая секция.

напряжении на батарее около 3 кВ и силе тока 400–430 кА. Длительность импульса тока равна 0,8–1 мс.

В результате повышения давления в к.в.д. происходит разрыв стальной диафрагмы, что приводит к формированию ударной волны, распространяющейся в к.н.д. На противоположном от диафрагмы конце к.н.д. расположена форкамера сверхзвукового сопла. Между соплом и форкамерой установлена еще одна диафрагма из меди, которая позволяет реализовать дальнейшее истечение газа в заранее вакуумированный объем рабочей камеры, обеспечивая запуск сопла и режим недорасширения потока.

Раскрытие диафрагмы на входе в сопло происходит в результате скачка давления газа за отраженной ударной волной в к.н.д. При этом, в соответствии с одномерной теорией развития газодинамических процессов в ударной трубе, за отраженной ударной волной поддерживаются квазистационарные параметры воздуха. Измерения скорости ударной волны в к.н.д. и давления в форкамере сопла осуществляются с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков, сигнал с которых также используется для синхронизации устройств ионизации и регистрирующей аппаратуры диагностического комплекса. Эти параметры позволяют рассчитать режим работы сверхзвукового сопла, используя известные газодинамические функции. Рабочий газ ускоряется в сопле до скорости порядка 2000 м/с, формируя газовую струю, истекающую

в рабочую часть установки, которая через фланец соединена с ресивером объемом 0,7 м³. Начальное давление в ресивере составляет порядка 10⁻³ Торр. Геометрия прямоугольной рабочей части и диаметры наблюдаемых окон позволяют исследовать газодинамические процессы моделей с характерным размером по маршевой координате 30–100 мм.

Сверхзвуковое сопло Лавалья выполнено из двух частей: профилированного диффузора и сменного конфузора. Выходное сечение диффузора имеет диаметр 105 мм. Сменная часть сопла позволяет менять число Маха потока в рабочей камере путем уменьшения площади критического сечения. При отношении диаметра критического сечения к диаметру к.н.д. около 1/10 истечение газа из области за отраженной ударной волной слабо влияет на параметры торможения газа на входе в сопло. Таким образом, расчетные числа Маха потока на срезе сопла ограничены в меньшую сторону величиной $M = 6$. Максимальная же величина чисел Маха потока $M = 12$ определяется возможностями использования современных оптических методов регистрации структуры потока. При сильном уменьшении плотности потока возникают трудности использования многих оптических методов исследования течений при обтекании различных тестовых моделей. Всего в арсенале установки имеются четыре варианта сменных конфузоров для моделирования чисел Маха потока 6, 8, 10 и 12.

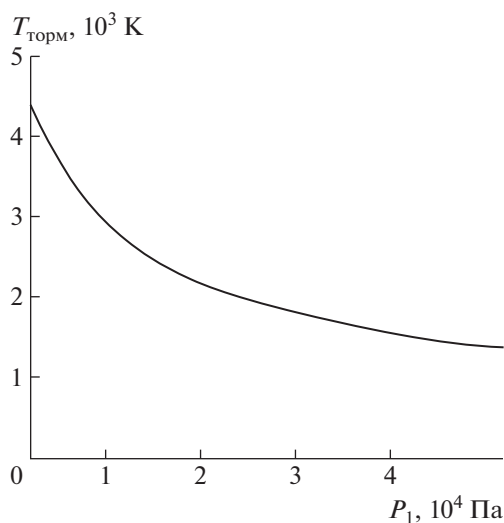


Рис. 2. Зависимость температуры торможения рабочего газа от начального давления в к.н.д.

Явными преимуществами использования техники ударной трубы являются простота и хорошая точность расчета параметров рабочего газа за проходящей и отраженной ударными волнами, а также на срезе сверхзвукового сопла. Величины параметров торможения потока для выбранных величин чисел Маха определяются расчетными значениями давления для отраженной от торца форкамеры ударной волны. Параметры газа за отраженной ударной волной могут быть достаточно точно определены по величине начального давления рабочего газа и скорости распространения фронта ударной волны в к.н.д.

Магнитная система

Используемый электромагнит, в центре которого расположена рабочая камера, способен генерировать постоянное и однородное магнитное поле с индукцией до 2.5 Тл в течение всего времени работы установки. Магнит состоит из набора обмоток, находящихся в железном ярме. В верхней части магнита также имеется канал для установки электронной пушки, используемой для ионизации течения. В нижней части магнита установлен стальной сердечник, что, в совокупности с размещением в стенках корпуса магнита оптических окон, приводит к незначительной неоднородности магнитного поля по объему в рабочей части установки (не более 10%). С увеличением магнитного поля происходит уменьшение степени его неоднородности по пространству. Это связано с насыщением стальных элементов корпуса электромагнита, окружающего рабочую камеру. В результате насыщения влияние этих элементов на распределение магнитного поля сни-

жается. Приемлемая однородность магнитного поля достигается при величине его индукции свыше 0.15 Тл. При меньших значениях индукции магнитного поля стоит учитывать его неоднородность в зависимости от условий задачи.

Устройства для ионизации газовых потоков

Для решения задач магнитоплазменной аэродинамики необходимо наличие ионизованного газа, подверженного воздействию электрических и магнитных полей. Согласно рис. 2, температура торможения потока в зависимости от начального давления рабочего газа в к.н.д. практически не может достигать значений, обеспечивающих термическую ионизацию газа без применения дополнительных устройств. Для объемной ионизации высокоскоростного потока в работе экспериментального стенда могут применяться электронные пучки, вводимые в поток вдоль магнитного поля [6], а также электрические разряды электродов, установленных на поверхности модели или в потоке, с помощью различных генераторов тока. Импульсный высоковольтный однополярный разряд может быть создан с помощью длинной линии конденсаторов [7–10]. Для инициирования высокочастотных разрядов постоянного и переменного тока с частотой до 1 МГц используются соответствующие генераторы тока [11]. Таким образом, возможно создать условия локальной ионизации газа для решения различных схем взаимодействия в зависимости от поставленной задачи.

Диагностический комплекс

Кратковременность реализуемого квазистационарного режима истечения из сопла и ионизации газа с помощью импульсных разрядов требует использования соответствующего оборудования и методик. Для измерения газодинамических параметров используются высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления, а для измерения параметров разряда – высокочастотные трансформаторы тока и осциллографы. Для синхронизации работы всех исполнительных и измерительных устройств используются высокоточные генераторы задержки импульсов.

Оптическая регистрация структуры течения осуществляется с помощью высокоскоростной шпирен-видеосъемки. В качестве оптического ножа используется адаптивный визуализирующий транспарант [12], позволяющий одновременно исследовать газодинамические процессы низкой плотности и наблюдать за излучением плазменных образований. Для обеспечения малых времен экспозиции (1 мкс) и высокой частоты съемки (до 480 кГц) в оптической системе применяется CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)-камера Photron Fastcam SA-Z.

Газодинамические параметры рабочих режимов установки

Представленный м.г.д.-стенд позволяет моделировать параметры потока, характерные для условий высокоскоростного полета в атмосфере Земли на высоте 30–60 км над уровнем моря. На рис. 3 представлены диапазоны моделируемых чисел Рейнольдса и основных параметров потока воздуха в зависимости от числа Маха потока. Диапазоны ограничены кривыми минимальных и максимальных значений, обусловленных выбором начальных параметров газов в ударной трубе и энергии электродугового подогрева толкающего газа в к.в.д. Стоит отметить, что установка позволяет моделировать высокоскоростное движение тел в атмосферах других планет при использовании газовых смесей, отличных от воздуха.

Теория ударной трубы обстоятельно изложена в работах [13, 14], основные положения которых были использованы для расчета параметров торможения в форкамере сопла. Расчет параметров потока на срезе сверхзвукового сопла осуществляется с использованием известных газодинамических функций [15]. В расчете используются начальные параметры рабочего и толкающего газов, а также энергетические характеристики электродугового подогрева толкающего газа в к.в.д. Более точный расчет параметров в форкамере сопла осуществляется с использованием скорости проходящей ударной волны, которая измеряется по времени ее прохождения между высокочастотными датчиками давления, установленными в стенку к.н.д. Для верификации расчета используются величины давления за проходящей и отраженной ударными волнами в к.н.д, а также величина давления торможения в потоке на срезе сопла.

Как можно видеть из графиков, моделирование условий высотного полета на м.г.д.-стенде происходит главным образом по величине давления и плотности воздуха. Использование ударной трубы позволяет реализовать расчетный режим в широком диапазоне параметров и решать специфические задачи магнитоплазменной аэродинамики.

ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ М.Г.Д.-ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

На м.г.д.-стенде ИТПМ СО РАН были проведены эксперименты, направленные на исследование м.г.д.-воздействия на ударно-волновую структуру течения при сверхзвуковом обтекании тел различной геометрии, таких как пластина, клин, затупленное тело и др.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для ионизации высокоскоростных течений при моделировании м.г.д.-взаимодей-

ствия вблизи обтекаемого тела могут быть использованы как электронные пучки [6], так и электрические разряды различных типов [7–11]. Исследования м.г.д.-взаимодействия при высоких значениях магнитной индукции продемонстрировали возможность значительного изменения ударно-волновой структуры потока и местного числа Маха потока в условиях высокоскоростного полета. На рис. 4 представлены фотографии волновой структуры обтекания пластины и свечения плазмы импульсного электрического разряда, иллюстрирующие м.г.д.-взаимодействие в потоке около модели – пластины.

По результатам экспериментов были определены характерные величины параметра гидромагнитного взаимодействия, при которых наблюдаются изменения угла наклона (рис. 4а) и формы присоединенного скачка уплотнения (рис. 4б), а также формирование отошедшего скачка в области локального м.г.д.-взаимодействия (рис. 4в). В этих экспериментах при величинах магнитного поля более 0.8 Тл реализовалось сильное м.г.д.-взаимодействие и наблюдались нестационарные процессы колебания области м.г.д.-взаимодействия и головной ударной волны вдоль поверхности модели [7]. Однако существуют и квазистационарные условия обтекания модели при м.г.д.-воздействии на структуру потока. Было показано, что увеличение давления в зоне м.г.д.-взаимодействия у поверхности обтекаемой модели может привести к генерации висячих скачков уплотнения [11], что может быть использовано для создания управляющих моментов в качестве эквивалента действия аэродинамического щитка. В рассмотренной работе данный эффект можно охарактеризовать термином “м.г.д.-элэрон”.

При обтекании затупленного тела (модели спускаемого аппарата) локализация области м.г.д.-взаимодействия перед моделью может привести к отходу головного скачка уплотнения и к уменьшению теплового потока к поверхности [9, 10]. Область локального ускорения потока вблизи тел с помощью м.г.д.-взаимодействия может значительно повлиять на величину лобового сопротивления модели. На рис. 5 представлены снимки процесса м.г.д.-взаимодействия в воздушном потоке с числом Маха $M = 6$ при различных величинах магнитного поля. Видно, что при малых значениях магнитного поля, $B = 0.3$ Тл, электромагнитная сила, действующая на разряд, не может преодолеть силу скоростного напора набегающего потока, дуга разряда горит за пределами донной части модели. При величине поля $B = 1$ Тл разряд концентрируется вблизи границ шарообразной головной части модели. А при величине магнитного поля $B > 1.5$ Тл происходит движение плазмы навстречу потоку, что приводит к отходу головного

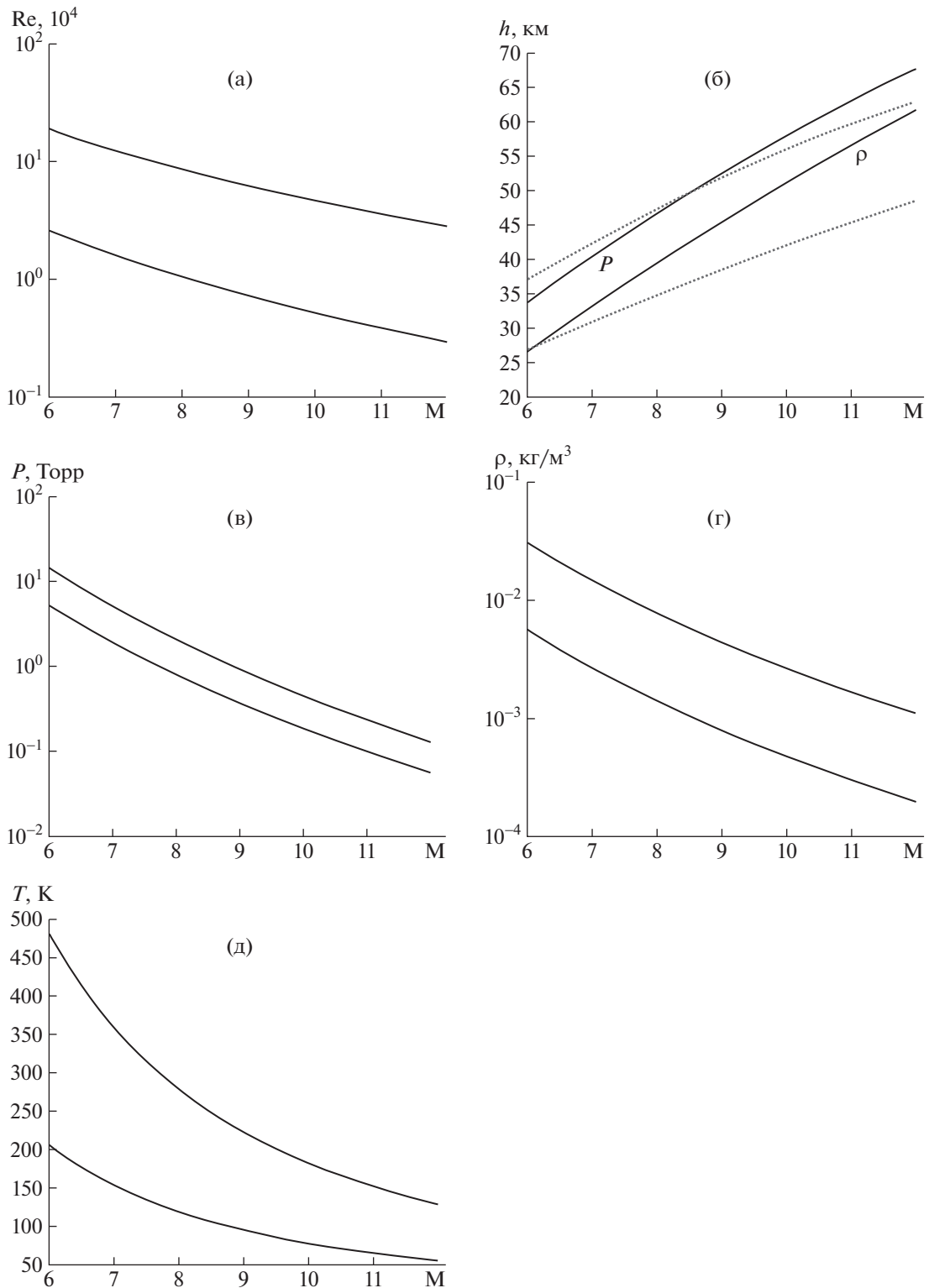


Рис. 3. Газодинамические параметры рабочих режимов экспериментального стенда: **а** – диапазон реализуемых чисел Рейнольдса; **б** – диапазоны давления P и плотности ρ газа, моделирующих полет летательного аппарата на соответствующей высоте; **в** – диапазон давления рабочего газа за ударной волной; **г** – диапазон плотности рабочего газа за ударной волной; **д** – диапазон температуры рабочего газа за ударной волной.

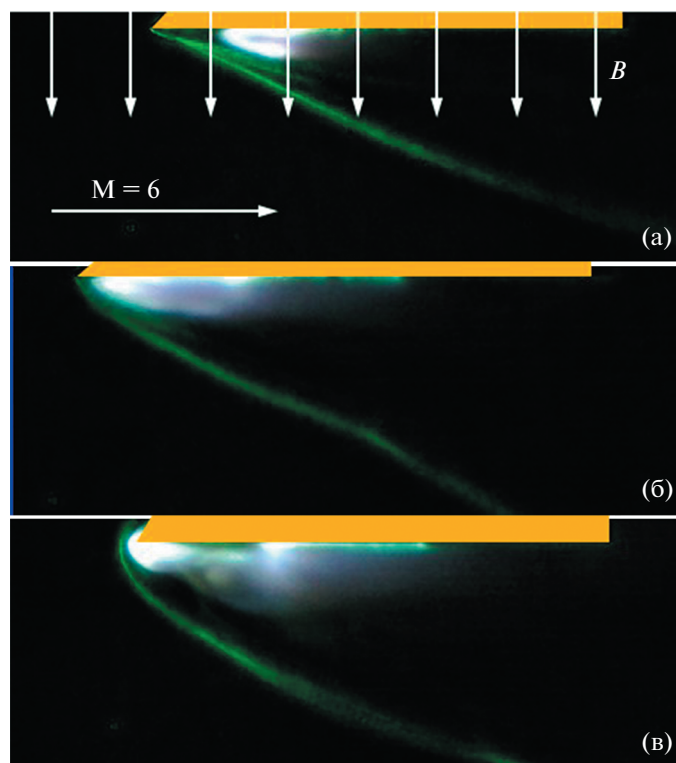


Рис. 4. Магнитогазродинамическое взаимодействие при сверхзвуковом обтекании поверхности пластины при разных величинах магнитной индукции B : а – 0.1, б – 0.3, в – 0.7 Тл.

скачка уплотнения и изменению эффективной формы головной части.

Выполненные эксперименты показали, что, выбрав оптимальную схему м.г.д.-взаимодействия вблизи поверхности модели, можно существенным образом изменить аэродинамические характеристики обтекания объекта и создать на поверхности тела дополнительные силы и моменты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование техники ударной трубы при создании м.г.д.-стенда в ИТПМ СО РАН позволяет проводить различные эксперименты в высокоскоростных потоках воздуха. Наличие мощной электромагнитной системы и устройств ионизации потока обеспечивает возможность использования установки для проведения магнитоплаз-

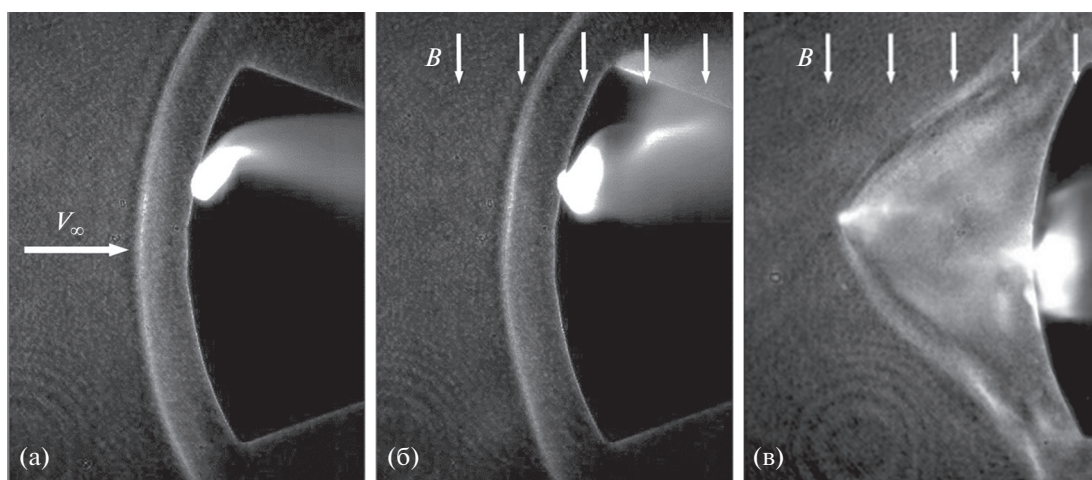


Рис. 5. Магнитогазродинамическое взаимодействие при сверхзвуковом обтекании затупленного тела при разных величинах магнитной индукции B : а – 0.3, б – 1, в – 1.6 Тл. V_∞ – скорость набегающего потока.

менных исследований в широком диапазоне параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Henshall B.D.* On Some Aspects of the Use of Shock Tubes in Aerodynamic Research. ARC Reports and Memoranda. № 3044. (ARC Tech. Rep. 17407) London, 1957. <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/3613>
2. *Nagamatsu H.N., Geiger R.E., Sheer R.E.* // ARS Journal. 1959. V. 29. № 5. P. 332.
3. *Nishihara M., Jiang N., Rich J.W., Lempert W.R., Adamovich I.V., Gogineni S.* // Physics of Fluids. 2005. V. 17. № 10. P. 106102. <https://doi.org/10.1063/1.2084227>
4. *Shinya Saito, Keisuke Udagawa, Kenji Kawaguchi, Sadatake Tomioka, Hiroyuki Yamasaki* // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 7–10 January 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1091>
5. *Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 5. С. 28.
6. *Кортаева Т.А., Фомичев В.П., Шашкин А.П., Ядренкин М.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 3. С. 10.
7. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 1. С. 28.
8. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 23. С. 31. <https://doi.org/10.21883/PJTf.2017.23.45273.16648>
9. *Кортаева Т.А., Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Прикладная механика и техническая физика. 2020. № 2. С. 8. <https://doi.org/10.15372/PMTF20200202>
10. *Фомичев В.П., Кортаева Т.А., Ядренкин М.А.* // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 1. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.15372/PMTF20200506>
11. *Фомичев В.П., Ядренкин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 1. С. 33.
12. *Павлов А.А., Павлов Ал.А.* // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. Доклады V Всероссийской конференции (Новосибирск, 26–29 марта 2013) Т. 2. Новосибирск: Параллель, 2013. С. 125.
13. *Glass I.I., Patterson G.N.* // J. Aero. Sci. 1953. V. 22. № 2. P. 73.
14. *Bleakney W., Taub A.H.* // Rev. Mod. Phys. 1949. V. 21. № 4. P. 584.
15. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.