

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОТНЫХ ПЕРЕРАСШИРЕННЫХ СОПЛ В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Андрей Алексеевич ТАЛАЛАЕВ родился в 1957 г. в городе Москве. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области ракетного двигателестроения. Автор более 40 научных работ.

Andrey A. TALALAYEV, Ph.D., was born in 1957, in Moscow. He is an Associate Professor at the MAI. His research interests are in the rocket propulsion engineering. He has published over 40 technical papers.

Петр Александрович КОЛОМЕНЦЕВ родился в 1987 г. в городе Москве. Студент МАИ. Основные научные интересы — в области ракетного двигателестроения.

Piotr A. KOLOMENTSEV, was born in 1987, in Moscow. He is a Student at the MAI. His research interests are in the rocket propulsion engineering.

Приведено описание газодинамического стенда, технических средств и методов исследований нестационарных течений в сопловых устройствах ракетных двигателей в земных условиях.

Особенности характера течения в перерасширенных высотных соплах (с отрывом потока от стенок), ярко выраженная зависимость величины тяги от входного давления (места расположения скачка уплотнения), необходимость определения пустотных характеристик и т.д. предъявляют повышенные требования к средствам и методам исследования высотных сопел.

Для изучения высотных сопловых устройств в земных условиях на газодинамическом стенде проводятся экспериментальные исследования по двум направлениям — сравнительные тяговые испытания (опосредованная оценка величин потерь тяги), дренажные и визуальные исследования особенностей внутренних течений газа.

Исследования потерь тяги в соплах требуют специальных методов измерения, так как их значения малы и составляют величины от сотых долей до нескольких процентов. Экспериментальные средства исследования обеспечивают проверку результатов расчетно-теоретических вычислений, а при изучении сложных течений в сопловых устройствах (например, щелевых соплах, комбинированных сопловых блоках) они являются единственным способом изучения газодинамики их проточных трактов.

Как нельзя лучше, для оценки качества вновь создаваемых или усовершенствования известных видов сопловых устройств служит газодинамическая дифференциальная установка (ГДУ) маятникового типа [1] (рис. 1).

Особенность установки состоит в том, что на ней с высокой точностью измеряется малая разность больших величин тяги модельных сопел при

одинаковых условиях на входе в них (расход газа, давление на входе). В качестве модельного компонента при испытаниях используется холодный сжатый воздух. Эксплуатационные параметры установки (располагаемый запас давления на входе в сопло — до $100 \cdot 10^5$ Па, расход воздуха — до 1,5 кг/с, диаметр минимального сечения сопла — до 10 мм) ограничиваются возможностями компрессорной станции.

Воздух высокого давления из магистрали 1 через хонейкомб 2, тензометрический стакан 3, вертикальную колонну 4, дифференциал 5, рабочие цилиндры 6 и 7 подается к сравниваемым соплам — соплу-компенсатору 8 и исследуемому соплу 9. Блоки делительных сопел 10, 11, реализуя критический перепад давления, обеспечивают разделение расхода воздуха к сравниваемым соплам в постоянном, практически одинаковом соотношении. В результате действия разности тяг, создаваемых сравниваемыми соплами, возникает изгибающий момент, который фиксируется тензорезисторами, расположенными на тензостакане 3, с последующим преобразованием в электрический сигнал.

Усовершенствованный тензометрический стакан (рис. 2) оснащен упругими элементами с расположенными на них тензодатчиками. Использование дополнительных упругих элементов позволило увеличить коэффициент преобразования примерно в 10 раз и полностью исключить дрейф «О» прибора, возникающий из-за перепада температур на тензостакане, так как изолированные тензодатчики не успевают охладиться во время проведения эксперимента. Кроме этого, использование съемных упругих элементов с тензодатчиками позволяет быстро

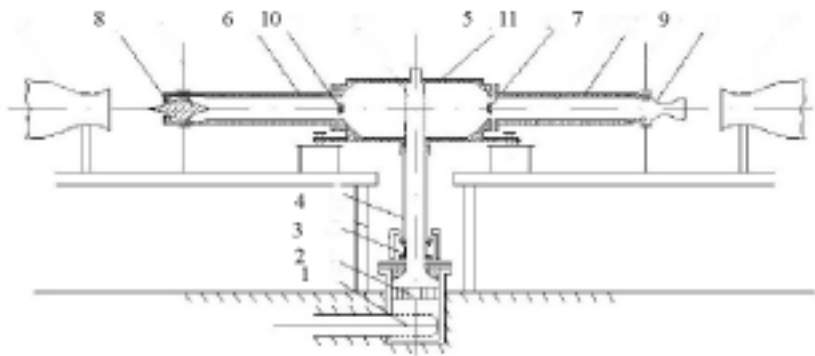
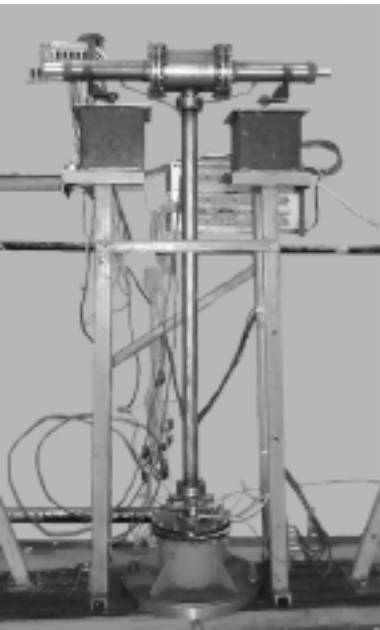


Рис. 1. Дифференциальная установка (общий вид, схема)

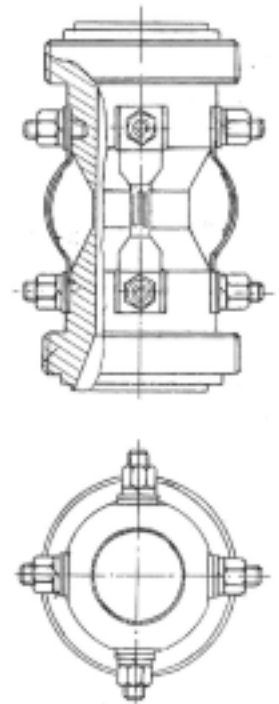
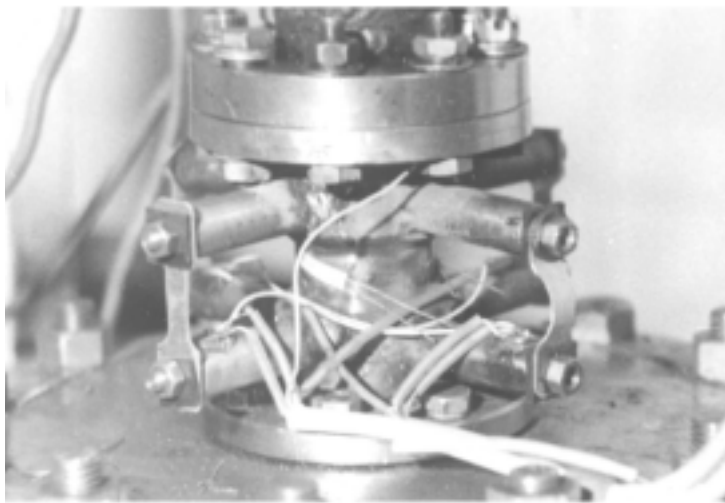


Рис. 2. Усовершенствованный тензостакан

осуществлять переналадку установки на различные диапазоны измеряемых усилий (разности тяг) путем из замены без демонтажа маятникового узла установки (замены тензостакана).

Применение усовершенствованного тензостакана и разработанные методики опосредованного сравнения сопл позволяют проводить измерения в широком диапазоне величин разности тяг (0,02—15 кгс).

В качестве сопла-эталона при опосредованных сравнительных испытаниях перерасширенных сопл

предложено использовать кольцевое авторегулируемое сопло с центральным телом [2] (рис. 3), позволяющее получать более точную «реакцию» установки на изменение тяги испытуемого сопла, «забросы» тяги при выходе на режим, нерасчетные режимы течения и обеспечивать непрерывную регистрацию параметров.

С целью определения пустотных характеристик высотных сопл, на ГДУ предусмотрена возможность создания определенного расчетного разрежения на срезах сопл, исключающего его работу со

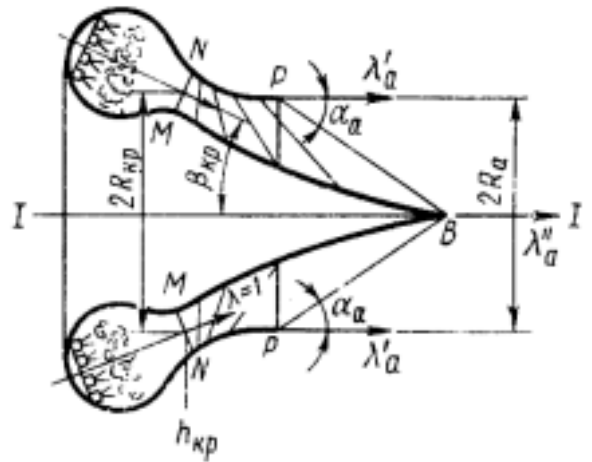
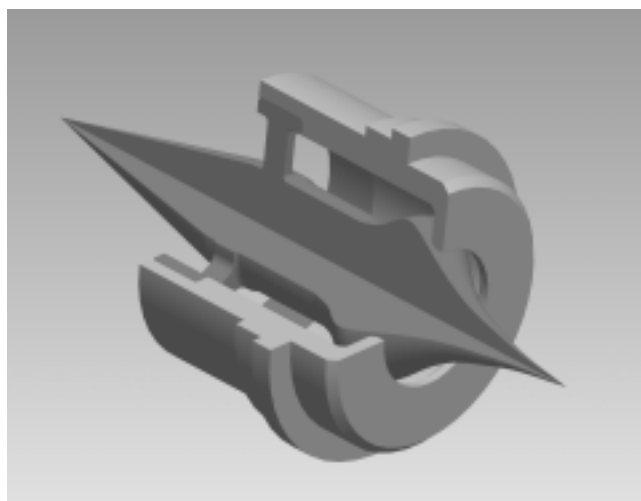


Рис. 3. Сопло с центральным телом

скачками уплотнения. Для обеспечения в земных условиях безотрывного течения газа в высотных соплах установка вместе со сверхзвуковыми соплами должна помещаться в барокамеру. Из-за габаритов установки и испытываемых сопел барокамера является довольно громоздким сооружением, для создания которого требуются достаточно большие материальные и временные затраты. Предлагаемое устройство — сверхзвуковой диффузор — просто в исполнении и не требует больших затрат, хотя выполняет ту же функцию, что и барокамера [3].

Основным назначением диффузора является изолирование выхлопной струи газа, истекающей из сопла, от внешней среды на некотором протяжении. Для этой цели диффузоры жестко и соосно пристыковываются к испытываемым соплам. При этом длина диффузора должна быть достаточной, чтобы вместить всю систему скачков, и должна составлять около 10 калибров. Проходя через систему скачков, поток постепенно замедляется, одновременно в нем

повышается давление до атмосферного: $p_{\text{диф}} = p_H$ (рис. 4).

Установка оснащена современной многоканальной автоматизированной системой измерений давления, статических и динамических деформаций (рис. 5).

Разработана структурная схема стенда для дифференциальных измерений разности тяг и давления (рис. 6) обеспечивающая:

- ввод в персональный компьютер (PC) с заданной точностью информации с датчиков давления с двадцати каналов измерения и с тензометрических датчиков с двух каналов измерения;
- обработку информации в реальном времени;
- вывод информации на экран монитора в удобном для анализа виде;
- сохранение информации в базе данных.

Назначение системы:

- измерения давления, статических и динамических деформаций;

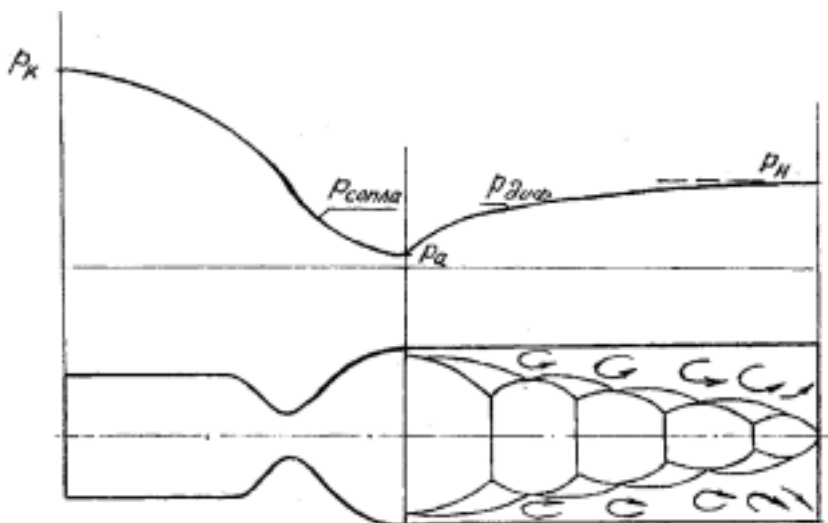


Рис. 4. Картина течения в сопле с диффузором

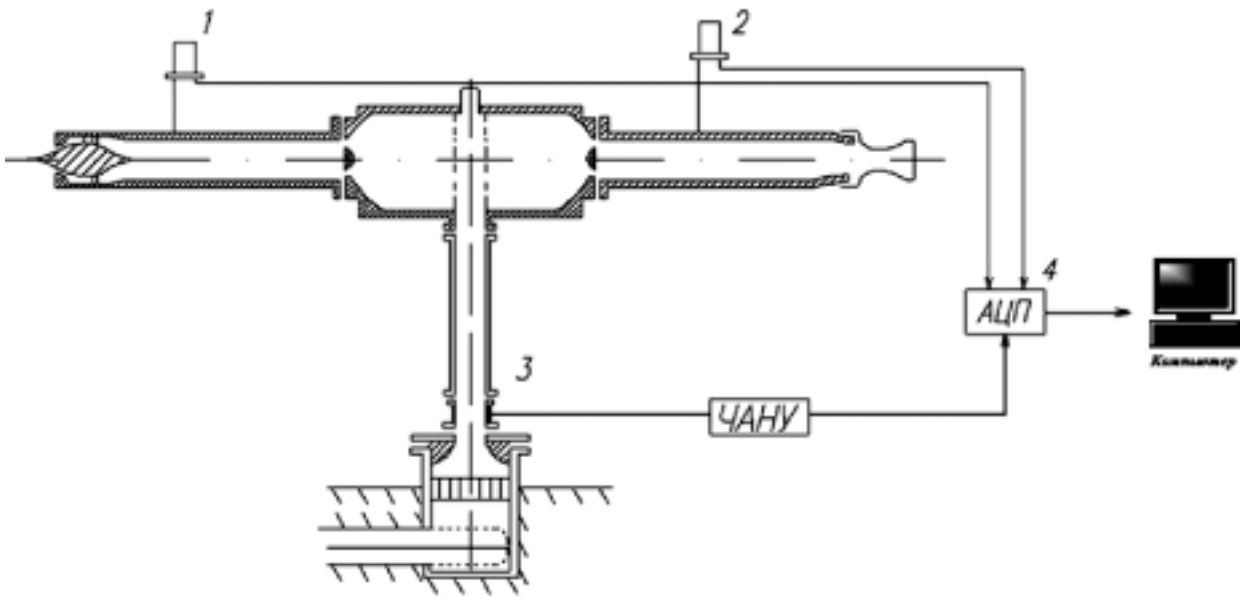


Рис. 5. Схема измерений дифференциальной установки:

1, 2 – датчики давления; 3 – тензометрический датчик; 4 – аналого-цифровой преобразователь

- контроль результатов измерений в реальном времени;
- вывод информации на экран монитора в удобном для анализа виде;
- сохранение информации в базе данных (БД);
- формирование отчетов.

При выборе программного обеспечения и основных функциональных элементов системы были использованы следующие критерии:

- оптимальное соотношение функциональности системы и её стоимости;
- малозатратная интегрированная среда разработки;
- минимальные сроки разработки.

Состав системы:

- персональный компьютер;
- многофункциональные платы АЦП PCI-1713 фирмы Advantech;

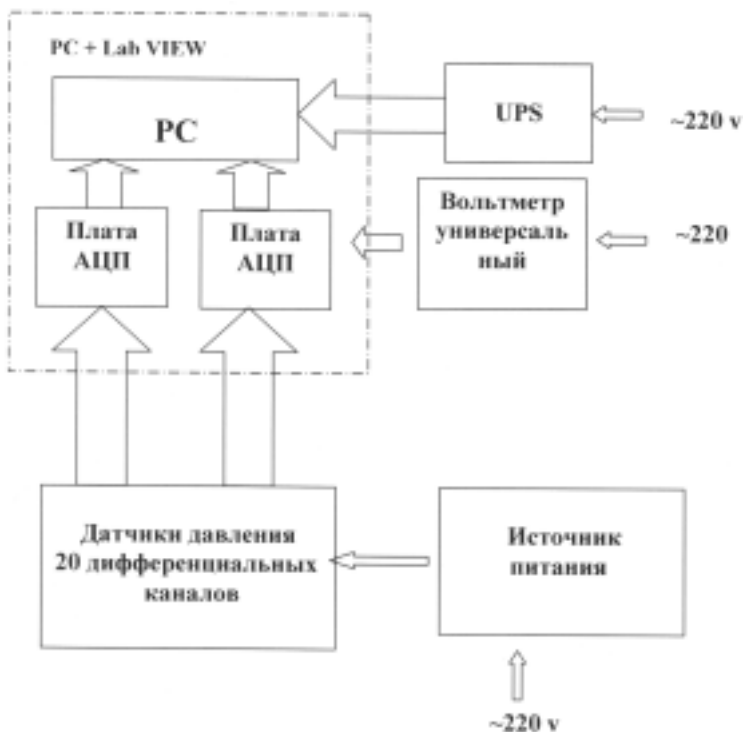


Рис. 6. Структурная схема измерительного стенда

— датчики давления и тензодатчики фирмы Honeywell;

— программное обеспечение TRACE MODE 6;

— разработанное программное обеспечение для: настройки, испытаний и функционирования системы и всего вспомогательного оборудования; формирования различных отчетов и протоколов по завершении настройки и испытаний (в текстовом протоколе отображаются записи о регистрации измерительных параметров и результаты последних регулировок);

формирования графических протоколов в режиме реального времени при эксплуатации оборудования (графический протокол позволяет в интерактивном режиме исследовать диаграммы работы исследуемого объекта).

Интегрированная среда разработки

Инструментальная система TRACE MODE(®) 6 фирмы *AdaStra*, основа программной составляющей системы — это универсальное средство разработки и отладки приложений для автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Интегрированная среда разработки TRACE MODE 6 представляет собой единую программную оболочку, объединяющую все основные компоненты инструментальной системы:

- SOFTLOGIC — систему программирования контроллеров;
- SCADA/HMI — систему разработки распределенной АСУТП.

Поддержка широкого спектра устройств сбора данных осуществляется за счет универсальной системы драйверов, что позволяет подключать к системе новые источники сигналов.

Алгоритмы управления

Связи между компонентами разных уровней, например между SOFTLOGIC-контроллером и сервером АСУТП или между двумя серверами, создаются автоматически с помощью уникальной технологии автопостроения в рамках единого проекта распределенной АСУ. Поэтому вычисления могут быть легко перенесены из компьютера в контроллер и наоборот. Все редакторы тесно интегрированы со средствами отладки, благодаря чему достигается максимальный комфорт разработки сложных распределенных АСУТП.

Автоматизированная система измерений и обработки

Ядром автоматизированной системы измерений является программно-аппаратный комплекс изме-

рительного стенда, который состоит из датчиков давления и деформаций, компьютера со встроенной платой АЦП, клеммной платы, ПО Trace Mode, ПО MS Access, ПО MS Excel.

Получение и обработка данных (вплоть до формирования отчетов о проведении эксперимента) в MS Excel может проводиться на любом компьютере, имеющем ПО MS Access, MS Excel, в том числе на компьютерах, подключенных к компьютеру оператора через локальную сеть; содержание отчетов ограничивается только возможностями MS Excel по обработке данных электронных таблиц (рис. 7).

С помощью ПО Trace Mode данные с АЦП (модель PCI-1713) записываются в базу данных (БД) под управлением СУБД Access. В БД результаты эксперимента записываются в виде 16 значений напряжений (в вольтах), снятых с 16 дифференциальных каналов. Каждая запись в БД, помимо 16 значений напряжений, содержит вспомогательные данные — время, когда была сделана запись, две переменные по умолчанию, используемые для обозначения входного давления и номера текущего датчика. Запись в БД происходит с частотой 1,8 Гц. По окончании эксперимента файл типа БД MS Access конвертируется в файл — электронную таблицу типа MS Excel. Полученные после эксперимента файлы базы данных и MS Excel переиме-



Рис. 7. Алгоритм обработки и представление результатов

новываются: в их названии включается дата и время проведения эксперимента, они переносятся в папку, отведенную под хранение данных экспериментов. На DVD-дисках и (или) другом компьютере создаются их резервные копии. Настоятельно рекомендуется хранить полученные после экспериментов данные на защищенном от перезаписи носителе (DVD+R, DVD-R, CD-R), с тем чтобы защитить их от компьютерных вирусов, так как в данном случае данные хранятся в форматах данных, подверженных заражению.

Для проведения дренажных испытаний и визуальных наблюдений течения газа в сопле и за его срезом создана отдельная газодинамическая установка, пневмосхема которой представлена на рис. 8.

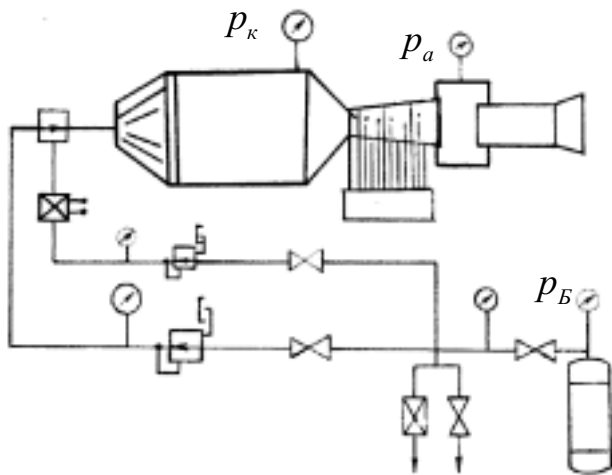


Рис. 8. Пневмосхема газодинамической установки

Датчиками давления (мановакууметрами) фирмы Honeywell фиксируется картина распределения статического давления вдоль сопла (рис. 9).

Многоканальная автоматизированная система измерения давления используется для определения

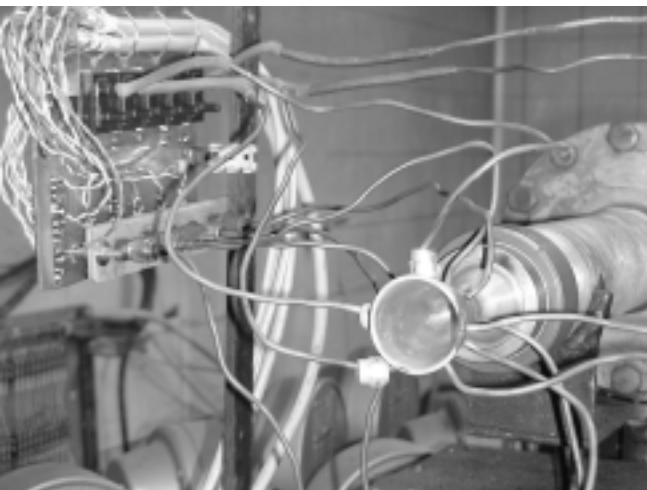


Рис. 9. Дренированное сопло

места отрыва потока газа от стенки сопла Лавалья путем одновременного измерения статического давления газа по длине сверхзвуковой части сопла.

Датчиками регистрируется давление газа в каждом сечении сопла. Сигналы с датчиков давления поступают на АЦП, который соединен с компьютером. Визуализация информации, полученной от датчиков с поверхности сопла Лавалья, осуществляется с помощью визуальных экранов на мониторе компьютера.

Для накопления информации используется БД MS Access. Передача данных осуществляется непосредственным выполнением SQL-запроса. Управление записью в БД осуществляется с визуальных экранов. В итоге данные от каналов, непосредственно связанных с измерительной аппаратурой, доводятся до MS Excel.

С использованием программы MS Excel после обработки экспериментальных данных строятся графики распределения давления по длине сверхзвуковой части сопла Лавалья при разных давлениях газа на входе в сопло. С помощью графика определяется место отрыва потока газа от стенки сопла.

По результатам дренажных испытаний (обрабатываемых в режиме реального времени), по разработанным программам проводится расчет основных параметров с учетом коэффициентов тарировки (проводимых заранее) и строятся соответствующие графики (рис. 10)

Для исследования структуры течения потока газа внутри сопла и за его срезом использован теневой прибор ИАБ-451 (рис. 11). Характерный вид шлирен-изображения струи за срезом конического сопла представлен на рис. 12.

Использование теневого прибора позволяет с большой точностью определить место отрыва потока от стенки сопла и картину восстановления давления за ним. Установка оснащена видеокамерой, сигнал с которой непрерывной записью фиксиру-

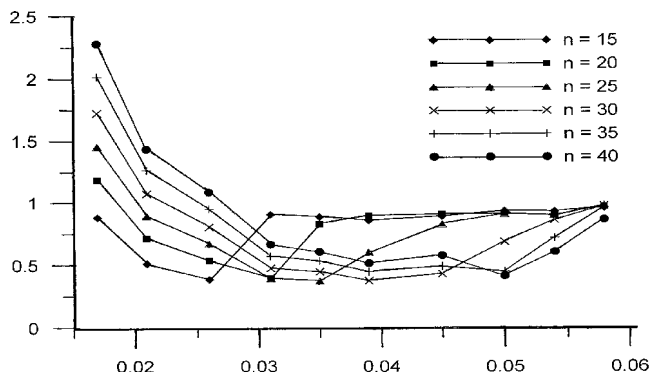


Рис. 10. Распределение давления по длине сопла

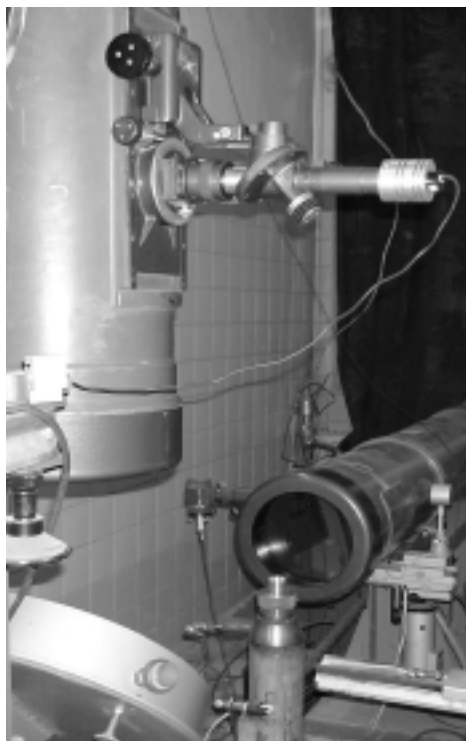


Рис. 11. Теневой прибор

ется компьютером, при этом обеспечена временная связь с изменяющимися параметрами режимов работы установки (режимами работы соплового устройства). Для получения картины течения внутри соплового устройства его необходимо изготавливать из прозрачного материала с соблюдением необходимых условий по прозрачности и с учетом запаса прочности.

Выводы

Создан современный газодинамический стенд для всестороннего изучения реактивных сопел ракетных двигателей. На дифференциальной установке с большой точностью возможно определение уровня потерь тяги в известных и вновь создаваемых (перспективных) сопловых устройствах. Газодинамическая установка позволяет численно оценить величину (по результатам дренажных испытаний) и характер распределения давления (визуальные исследования) вдоль сверхзвуковой части сопла. Разработана и создана современная автоматизированная система сбора, обработки и хранения экспериментальной информации для измерений давления и тензометрии.

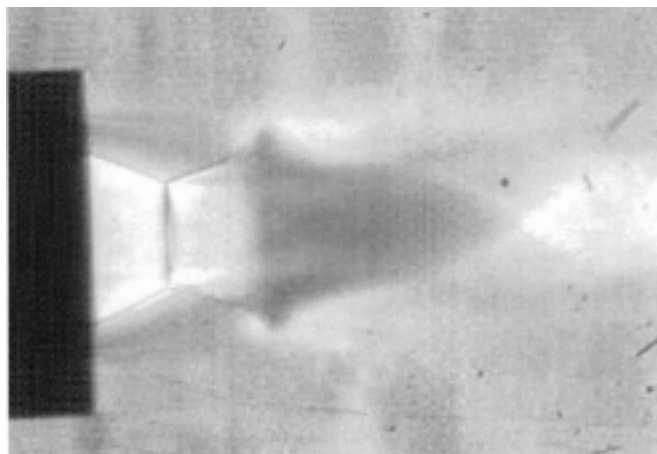


Рис. 12. Картина течения за соплом

Summary

A gas-dynamic test bench is described as well as tools and techniques to study non-steady flows within nozzle assemblies of liquid-propellant rocket engines in earth conditions.

Библиографический список

1. *Сергиенко А.А.* Дифференциальная установка для сравнительных испытаний сопел // Труды НИИ-1. 1959. № 28.
2. *Семенов В.В., Талалаев А.А., Квон Мин Чан.* Дифференциальная установка маятниковой конструкции. Патент № 55983. 2005. Библиотека Роспатента (www.fasi.gov.ru).
3. *Семенов В.В., Талалаев А.А.* Имитация высотных условий работы при испытаниях реактивных сопел на газодинамической дифференциальной установке // Вестник МАИ. 2006. Том 13. № 1.
4. *Петунин А.Н.* Методы и техника измерений параметров газового потока. — М.: Машиностроение, 1996.
5. *Репик Е.У., Кузнецов В.К.* Погрешность измерения статического давления при использовании дренажных отверстий // ИФЖ. 1989. Т. 57. №6.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 14.09.2007