

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Тема работы: Расчетно-экспериментальное моделирование течения в гиперзвуковом воздухозаборнике с компактным сечением внутреннего канала.

2. Аннотация: Исследована модель гиперзвукового воздухозаборника, основанного на принципе сжатия по сходящимся в пространстве направлениям захватываемой струи. Такой конвергентный воздухозаборник (КВЗ) позволяет иметь высокую степень сжатия и компактное сечение внутреннего канала, что упрощает теплозащиту воздухозаборника и камеры сгорания.

Цель проведенных расчетных и экспериментальных исследований состояла в установлении влияния пограничного слоя на запуск и интегральные характеристики воздухозаборника путем применения слива пограничного слоя через щели и бокового растекания на поверхности внешнего сжатия.

Получены распределения давления на поверхностях сжатия и в канале воздухозаборника, определены коэффициенты расхода и восстановления полного давления, числа Маха в горле воздухозаборника. Установлены особенности структуры течения для трех вариантов воздухозаборника в области внешнего сжатия: с боковыми щелями, боковыми щелями с щелями и без боковых щек. Определено влияние слива пограничного слоя и бокового растекания на запуск и интегральные характеристики гиперзвукового воздухозаборника с компактным поперечным сечением внутреннего канала. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

3. Состав коллектива:

Акинин Сергей Алексеевич, студент, лаборант ИТПМ СО РАН, Лаб.13. Физических проблем управления газодинамическими течениями.

Старов Алексей Валентинович – к. т. н., научный сотрудник ИТПМ СО РАН.

4. Научное содержание работы:

Экспериментальные исследования проведены в аэродинамической трубе периодического действия Т-313 при числах Маха $M_n = 6, 7$ и импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М при числах Маха $M_n = 6, 7$ и 8 в диапазоне углов атаки от 0° до 8° . Выполнена серия расчетов в вязкой постановке в программном комплексе ANSYS.

Для проведения исследований были выбраны 3 конфигурации конвергентного воздухозаборника. Конструкция модели позволяла установку на корпусе участка

внешнего сжатия боковых стенок (щек) различной формы для исследования влияния бокового растекания и возможности управления пограничным слоем. В боковых щелях имелись щели прямоугольной формы высотой 4 мм для слива пограничного слоя. Также возможны испытания модели без боковых щек на участке внешнего сжатия (рис.2). В экспериментах, помимо измерения статического давления на поверхности сжатия, измерялось полное и статическое давление в области горла, а также на выходе звукового сопла расходомера (рис.1). Проводилась теневая визуализация течения на участке входа горла.

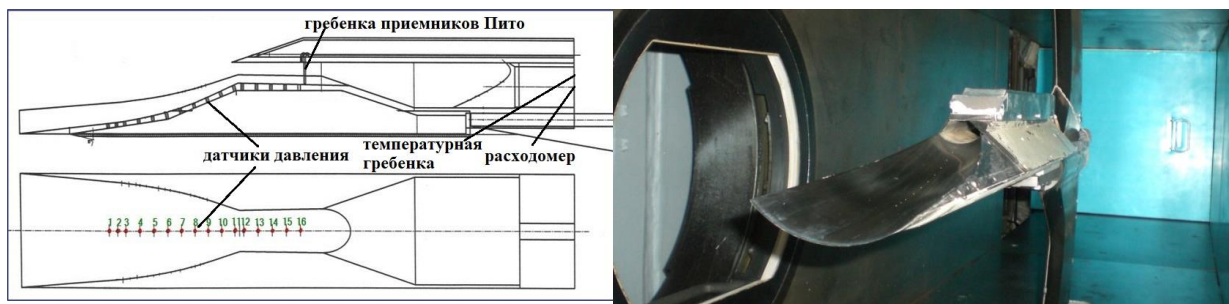


Рис. 1. Схема воздухозаборника с боковыми щелями и фото модели КВЗ без боковых щек.

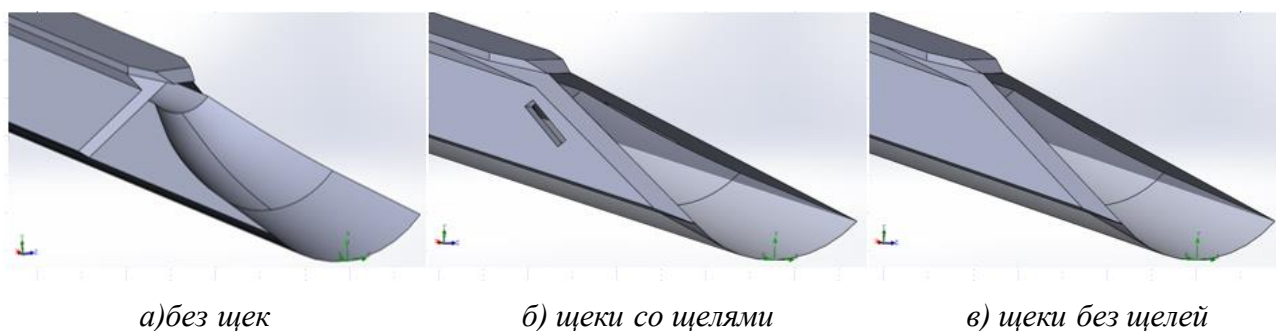


Рис. 2. Конфигурации модели воздухозаборника.

Эксперименты были проведены при следующих параметрах воздушного потока и углах атаки:

Таблица 1.

Т-313	ИТ-302М
Числа Маха – $M = 6, 7$	Числа Маха – $M = 6, 7, 8$
Полное давление – $P_0 = 0.8 - 1.15$ МПа	Полное давление – $P_0 = 4,2 - 29$ МПа
Полная температура – $T_0 = 280-450$ К	Полная температура – $T_0 = 1550 - 1800$ К
Углы атаки – $0 - 6^\circ$	Углы атаки – $0 - 8^\circ$
Конфигурация 1, 2	Модель 1, 2,3

Численные расчеты выполнялись с использованием коммерческого программного продукта ANSYS Fluent. Создание 3D-модели трех конфигураций воздухозаборника осуществлялась в программе SolidWorks. Затем для создания структурированной расчетной сетки модель импортировалась в программный продукт ANSYS ICEM, где для каждой конфигурации модели строилась своя расчетная область и сетка. После этого расчетная сетка импортировалась в указанный вычислительный модуль ANSYS Fluent, где производился газодинамический расчет обтекания конфигураций модели на основе

полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных $k-w$ / SST моделью турбулентности. Использовалась конечно-объемная разностная схема, основанная на решении уравнений для плотности (Density-Based). Задача считалась в стационарной постановке. Сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетом приводится ниже.

Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что в КВЗ со щечками происходит значительно большее повышение давления, чем без их установки. Этот эффект ослабляется при уменьшении числа Маха. В сечении входа в канал модели со щечками расчетное давление значительно выше экспериментальных значений. Щели в щечках для слива пограничного слоя не приводят к заметному снижению давления, что является подтверждением тенденции снижения влияния пограничного слоя на повышение давления с ростом числа Маха.

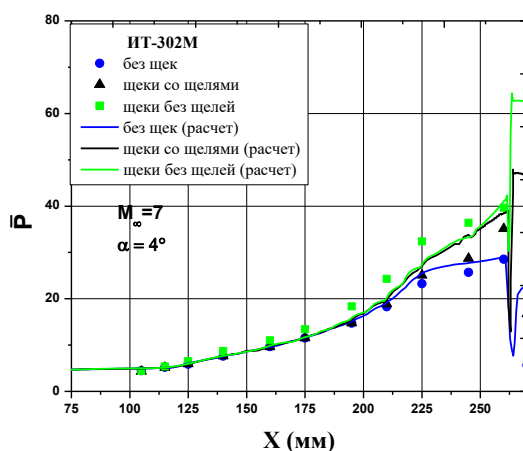


Рис. 3. Экспериментальное и расчетное продольное распределение относительного статического давления при числе Маха $M=7$ для условий ИТ -302М.

Поскольку при числах Маха, меньших расчетного, на поверхности внешнего сжатия реализуется пространственное течение, было рассчитано распределение статического давления P_z поперек модели. Проведенные расчеты показали (рис. 3), что при отсутствии боковых щек уменьшение давления к боковым кромкам достигает 70% на начальном ($X=165$ мм) участке внешнего сжатия от максимального давления в плоскости симметрии. Эта величина изменяется в зависимости от числа Маха и уменьшается вниз по потоку до 30% на входе в канал ($X=258$ мм).

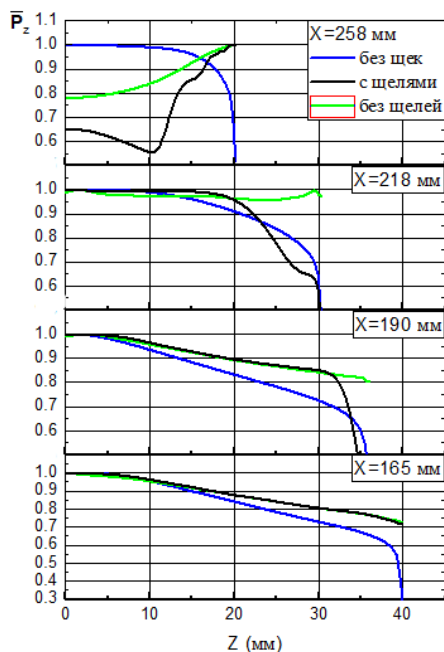
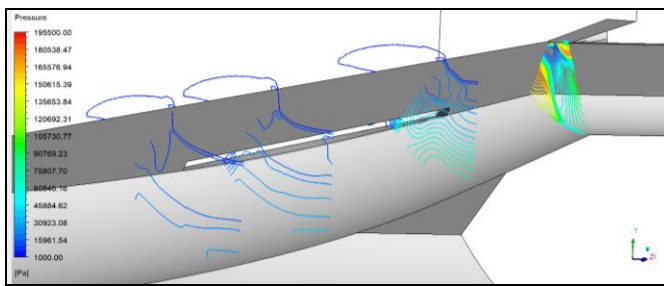
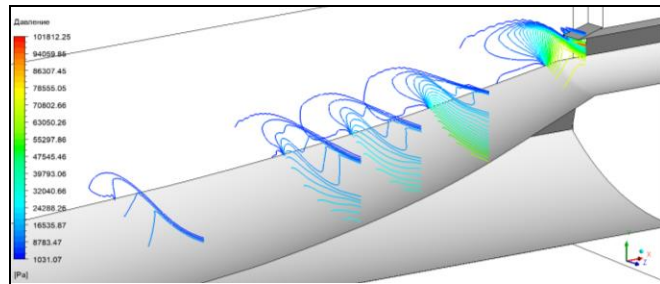


Рис. 3. Распределение относительного статического давления по Z для при числе Маха $M=7$, $\alpha=4^\circ$ в экспериментах на установке ИТ-302М.

Установка боковых щек приводит к снижению растекания, как это следует из того же рисунка. Отсутствие слива пограничного слоя приводит даже к некоторому росту давления вблизи боковых щек за счет сложного взаимодействия в угловой конфигурации. Полученные данные позволяют предположить, неравномерность поля давлений по ширине канала на входе двигателя можно обеспечить на приемлемом уровне путем подбора соответствующих щелей для слива пограничного слоя. Структура трехмерного обтекания поверхности внешнего сжатия показана на рис. 4. Вниз по потоку от передней кромки ударная волна изменяет форму от вогнутой на начальном участке до выпуклой на конечном участке. Такая форма ударной волны вблизи передней кромки остается вогнутой на всем диапазоне чисел Маха.



a)



б)

Рис. 4. Расчетное поле распределения статического давления по Z для конфигурации модели а) с щечками со щелями б) без боковых щек при числе Маха $M=7$, $\alpha=4^\circ$ на установке ИТ-302М.

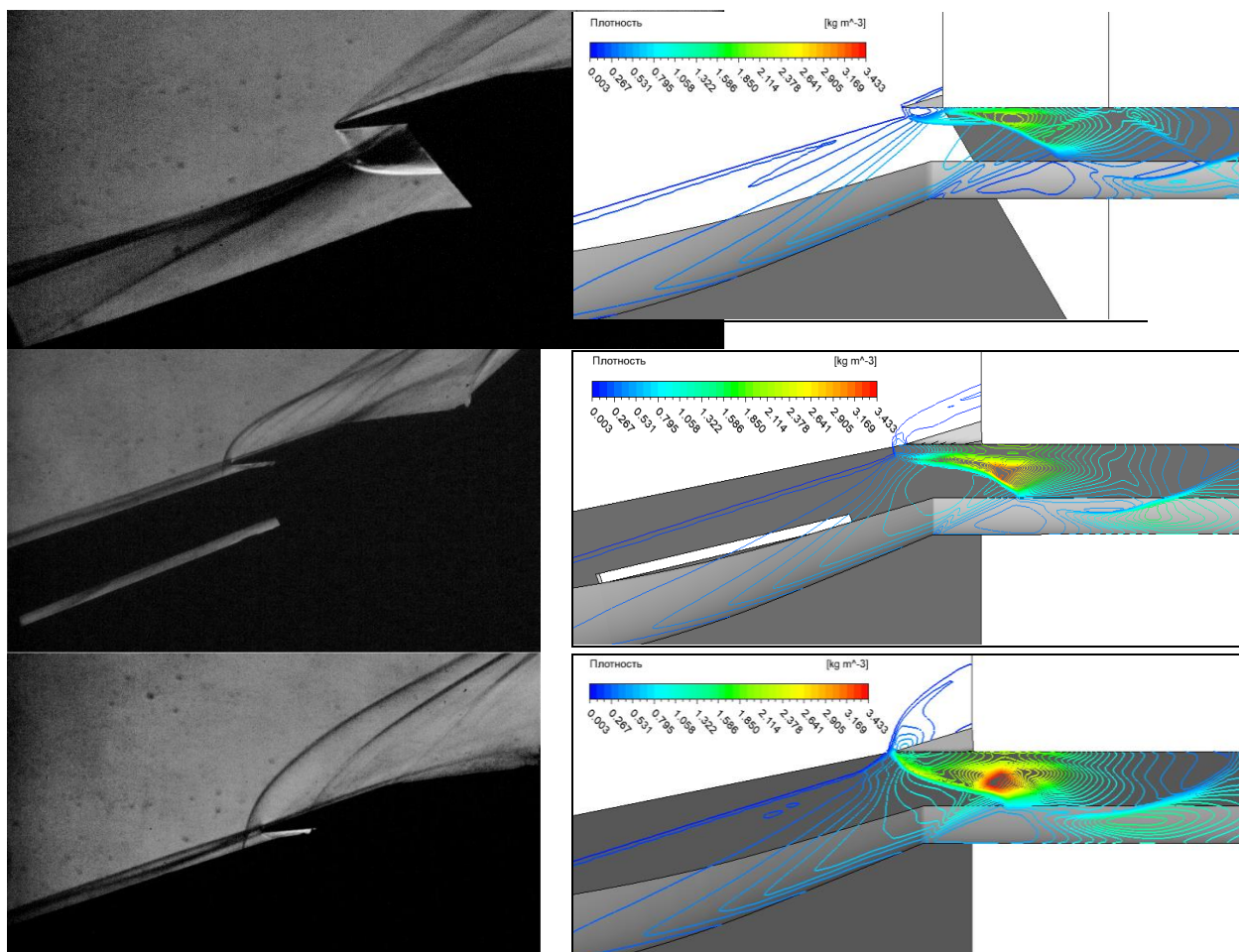


Рис.5 Визуализация течения и расчет плотности в плоскости симметрии в канале воздухозаборника различных конфигураций при $M_n = 7$ $\alpha=4^\circ$.

На основании измеренных полных и статических давлений в горле модели были определены числа Маха (M_2) и коэффициенты восстановления полного давления, которые

показаны на рис. 6 и 7. Видно, что во всем диапазоне чисел Маха набегающего потока, скорость в горле модели сохраняется сверхзвуковой, даже когда на вход модели приходит толстый пограничный слой. Видно, что коэффициент восстановления полного давления с щелями для слива был ниже при $M_n = 6$, чем в без щелей, но при высоких числах Маха $M_n = 8$ коэффициент восстановления давления для всех трех конфигураций становится одинаковым.

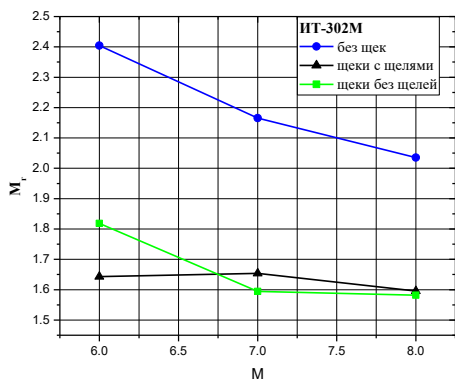


Рис. 6. Среднее число Маха в горле воздухозаборника.

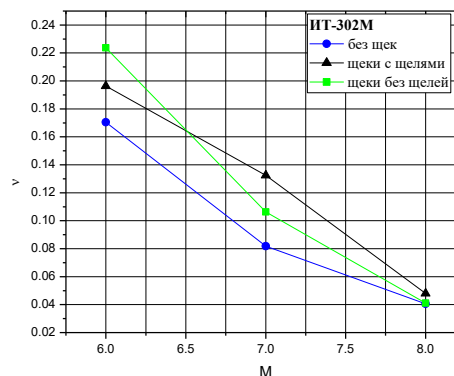


Рис. 7. Коэффициент восстановления давления.

Заключение

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования гиперзвукового воздухозаборника с компактным поперечным сечением внутреннего канала позволили:

1. Получить параметры течения и характеристики пограничного слоя на поверхности сжатия и в канале конвергентного воздухозаборника.
2. Определить интегральные характеристики воздухозаборника при числах Маха $M_n = 6, 7$ и 8 и углах атаки $\alpha = 0, 2, 4, 6$ и 8° .
3. Определено влияние слива пограничного слоя и бокового растекания.
4. Установить, что максимальный коэффициент расхода достигается в конфигурации модели со щечками без щелей ($f = 1,17$ при $M_n = 8$) с максимальным коэффициентом восстановления полного давления ($v = 0,22$ при $M_n = 6$). Среднее число Маха в горле M_2 во всех конфигурациях модели было сверхзвуковым и менялось в диапазоне от $M_2 = 1,58$ (щечки без щелей) до $M_2 = 2,4$ (без установки щек).
5. Установить, что ударный запуск в импульсной трубе позволил получить запущенное состояние воздухозаборника во всем исследованном диапазоне чисел Маха и углов атаки, включая вариант модели со щечками без щелей.

5. Эффект от использования кластера: Численные вычисления являлись одной из основных частей работы, поэтому использование вычислительного кластера с лицензионным ПО позволило сократить время счета и провести все необходимые расчеты. Моделирование системы осуществлялось с использованием пакета ANSYS Fluent.

6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

Акинин С.А., Старов А.В. Расчетно-экспериментальное исследование конвергентного воздухозаборника с компактным поперечным сечением внутреннего канала // Проблемы механики : теория, эксперимент и новые технологии : тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск- Шерегеш, 15 - 22 марта 2019 г.). -Новосибирск, 2019. -С. 5-6.