

УДК 629.7.022

Е.А. Українець

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ВОЗДУШНЫХ СИЛ

*Представлен анализ технического состояния комплекса аэродинамических труб Харьковского университета Воздушных Сил. Сделан вывод о невозможности проведения восстановительного ремонта аэродинамических труб высоких скоростей. Разработан вариант модернизации сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ для возобновления экспериментальных аэродинамических исследований. Снижение эксплуатационных затрат достигается отказом от непрерывного действия аэродинамической трубы с переходом на периодическое действие.*

**Ключевые слова:** аэродинамическая труба, модернизация, аэродинамические характеристики, технические характеристики, модельный эксперимент.

### Введение

Аэродинамические характеристики (АДХ) летательных аппаратов (ЛА) определяются экспериментальными, полуэмпирическими и численными методами аэродинамики. Полуэмпирические зависимости позволяют с инженерной точностью определять интегральные аэродинамические характеристики при незначительных модификациях формы таких объектов [1 – 3]. Однако, учитывая ограниченность экспериментальных данных для аэродинамических компоновок с использованием тонких аэродинамических эффектов, применение полуэмпирических зависимостей не всегда может считаться адекватным.

Натурный летный эксперимент остается до настоящего времени единственно надежным способом получения достоверной информации о реальных возможностях проектируемого ЛА, его динамических свойствах, управляемости и пилотажных качествах. Объясняется это рядом причин, к числу которых относятся:

– невозможность определения точных величин аэродинамических коэффициентов реального ЛА на основании продувок его модели в аэродинамических трубах и последующих расчетов;

– невозможность точно рассчитать на этапе проектирования степень деформации в полете реального ЛА и учесть эффект, обусловливаемый упругими деформациями его конструкции (вследствие незнания действительного распределения аэродинамической нагрузки и жесткости элементов его конструкции);

– отсутствие точных данных о степени возможного ухудшения тяговых характеристик двигателя после установки его на проектируемый ЛА;

– невозможность адекватно воспроизвести на земле реальные условия работы авиационного комплекса [4].

Однако аэродинамические характеристики ЛА, полученные в результате летных испытаний, содержат методические поправки, обусловленные принятой схемой разделения результирующей силы, действующей на самолет в полете, на две составляющие: аэродинамическую силу и тягу двигателей [4]. К числу особенностей летного эксперимента следует отнести большую нестационарность обтекания вследствие турбулентности атмосферы, случайных отклонений самолета по высоте, скорости, углу атаки. Следует учитывать также специфические условия измерений и функционирования измерительных систем в условиях полета: нестационарность обтекания, переменное атмосферное давление и температура, перегрузки, вибрации. Эти факторы в определенной мере вносят дополнительные погрешности в измерения. К числу неучитываемых факторов вынужденно относятся деформации и технологические особенности поверхности [5]. Следует отметить, что методология летных исследований по мере усложнения и совершенствования самолетов постепенно превратилась в самостоятельное научное направление [6], проведение летных экспериментов непосредственно связано с риском для летных экипажей, высокими материальными и календарными затратами, невозможно на ранних стадиях проектирования ЛА.

Численные методы аэродинамики пока не являются основным средством проектирования самолетов, что связано с многообразием явлений, возникающих при обтекании самолетов во всем диапазоне их применения. Обтекание сложных пространственных форм несжимаемым и сжимаемым газом, существенные нелинейности сверхзвукового и трансзвукового обтекания, взаимодействия ударных волн, влияние вязкости, явления при больших углах атаки, отрывные и вихревые явления затрудняют создание универсального, надежного и доступного для массовых расчетов метода. Существуют внутренние проблемы вычислительной аэродинамики.

Так, в ряде случаев применение неудачной расчетной схемы может совсем не дать решения вследствие его неустойчивости [4]. Машинная точность вычислений также ограничена, следовательно, процесс решения краевой задачи сопряжен с появлением значительного числа источников погрешностей, которые влияют на точность выполнения соотношений как явно используемых в методе решения, так и явно в него не входящих. Нарушение этих соотношений означает изменение свойств среды по сравнению с изначально заложенными в расчет. Всякая погрешность, в том числе и локальная, приводит к подмене среды. Вследствие этого в рассчитываемом поле течения могут появляться фиктивные черты, не присущие действительной физической картине течения, и пропадать особенности реальной течения. Причем, вследствие нелинейности исходных уравнений, локальные возмущения среды могут проявляться в виде возмущений областей ниже по потоку [4]. Таким образом, для получения численным методом надежного результата необходима его тщательная проверка, то есть сравнение результатов численного эксперимента с аэродинамическим экспериментом, аналитическими решениями, расчетами известных авторов. Общее состояние аэродинамических исследований непосредственно связано с развитием взаимно дополняющих друг друга численных и экспериментальных методов аэродинамики.

Несмотря на прогресс в области теоретической аэродинамики определение аэродинамических характеристик самолета по испытаниям его моделей в аэродинамических трубах остается основным и самым надежным средством при разработке новых компоновок и совершенствовании уже существующих. Любые предложения по формированию компоновок и рекомендации, направленные на улучшение АДХ существующих самолетов, реализуются только после экспериментальной проверки на моделях в аэродинамических трубах (АДТ).

Результаты испытаний в АДТ моделей, предназначенных для исследовательских целей, используются для сравнительного анализа АДХ различных компоновок самолетов и их элементов. Для расчета летно-технических и маневренных характеристик конкретных самолетов результаты испытаний в АДТ их геометрически подобных моделей (в особенности аэродинамическое сопротивление) приводятся к натурным условиям путем введения поправок. Величины поправок, их точность и методы определения зависят и от характеристик АДТ, и от особенностей компоновки самолета. В конечном итоге сопоставление АДХ, полученных в результате испытаний моделей в АДТ, приводит к установлению АДХ самолета, которые в сочетании с характеристиками двигателя принимаются за основу всех последующих анализов и расчетов [7]. Следует отметить, что

состояние аэродинамических исследований в аэродинамических трубах непосредственно связано с состоянием лабораторной базы.

**Целью статьи** является анализ технического состояния комплекса аэродинамических труб Харьковского университета Воздушных Сил для экспериментальных аэродинамических исследований и теоретическое обоснование модернизации вертикальной сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ.

## Результаты исследований

На момент создания Харьковского университета Воздушных Сил лабораторная база кафедры аэродинамики и динамики полета состояла из:

- дозвуковой аэродинамической трубы малых скоростей Т-1;
- трансзвуковой аэродинамической трубы СТ;
- сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ;
- гиперзвуковой аэродинамической трубы ГТ;
- учебных АДТ: дозвуковой аэродинамической трубы УТ-1, малых дозвуковых аэродинамических труб, винтового прибора, малой сверхзвуковой аэродинамической трубы. Эти АДТ могут использоваться исключительно в учебных целях, для проведения аэродинамических исследований интереса не представляют.

Аэродинамическая труба малых дозвуковых скоростей Т-1 – замкнутого типа с открытой рабочей частью имеет сечение в виде восьмигранника, снабжена трехкомпонентными весами ЗКТ-1. Труба оснащена системой плавного управления скоростью потока в диапазоне от 1,5 до 50 м/с. Аэродинамический контур Т-1 с наименованием основных частей представлен на рис. 1, фотография внешнего вида – на рис. 2, основные технические данные сведены в табл. 1. Трансзвуковая аэродинамическая труба СТ – непрерывного действия, замкнутая, с закрытой рабочей частью. Аэродинамический контур СТ с наименованием основных частей представлен на рис. 3, основные технические данные сведены в табл. 2.

Таблица 1

Основные технические данные  
трубы малых дозвуковых скоростей Т-1

Размеры рабочей части:	
ширина	1,0 м
высота	0,7 м
длина	1,3 м
Степень поджатия сопла	5
Диаметр вентилятора	1,5 м
Число оборотов вентилятора /максимальное/	1000 об/мин
Мощность приводного электромотора	30 кВт
Скорость потока в рабочей части:	
максимальная	50 м/с
минимальная	1,5 м/с
Аэродинамическое качество	2,7

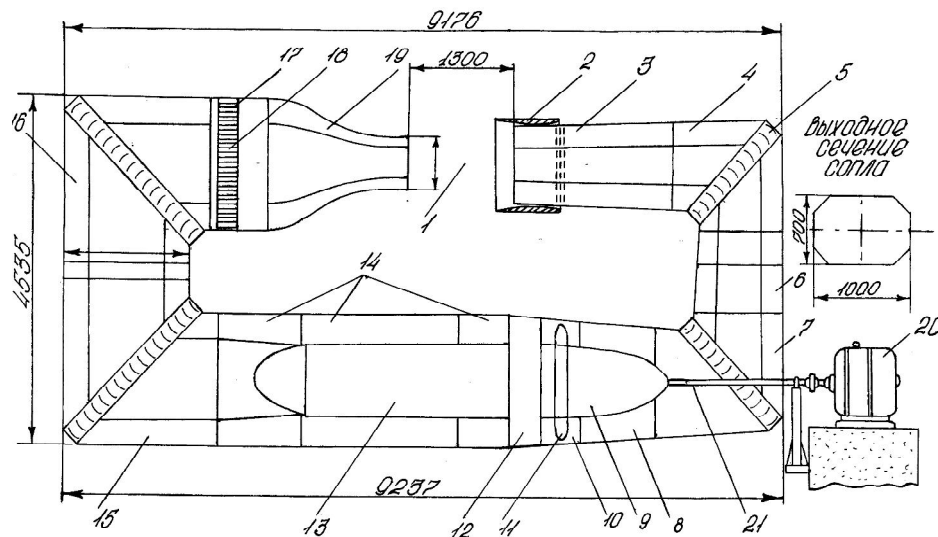


Рис. 1. Схема аэродинамического контура аэродинамической трубы Т-1:

- 1 – рабочая часть; 2 – кольцевой раструб; 3 – первый диффузор; 4 – колено №1; 5 – поворотные лопатки; 6 – второй диффузор; 7 – колено №2; 8 – переходник; 9 – передний обтекатель втулки вентилятора; 10 – вентиляторный отсек; 11 – вентилятор; 12 – спрямляющий аппарат; 13 – задний обтекатель втулки вентилятора; 14 – отсеки обратного канала; 15 – колено №3; 16 – колено №4; 17 – форкамера; 18 – спрямляющая решетка; 19 – сопло; 20 – приводной электромотор; 21 – вал

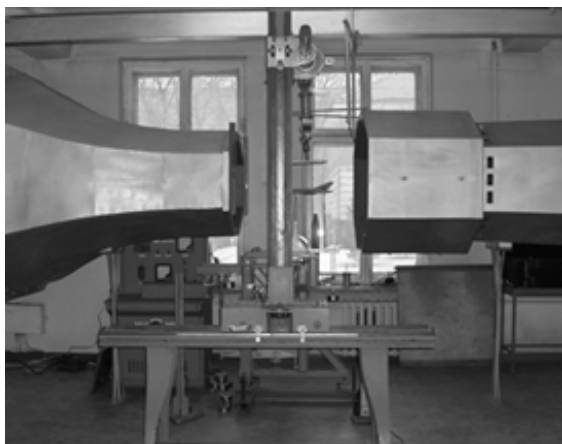


Рис. 2. Фотография внешнего вида аэродинамической трубы Т-1

Сверхзвуковая аэродинамическая труба СЗТ – непрерывного действия, незамкнутая, с закрытой рабочей частью прямоугольного сечения. Схема СЗТ представлена на рис. 4, фотография внешнего вида рабочей части – на рис. 5, основные технические характеристики СЗТ сведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические данные сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ

Размеры рабочей части:	
ширина	0,2 м
высота	0,15 м
длина	0,24 м
Мощность силового привода	1000 кВт
Разряжение в ресивере:	
при параллельной работе эксгаустеров	525 мм.рт.ст.
при последовательной работе эксгаустеров	590 мм.рт.ст.
при работе главного эксгаустера	560 мм.рт.ст.

Таблица 2

Основные технические данные трансзвуковой аэродинамической трубы СТ

Размеры рабочей части:	
ширина	0,3 м
высота	0,7 м
длина	0,6 м
Степень поджатия сопла	8,33
Диаметр вентилятора	1,1 м
Относительный диаметр втулки вентилятора	0,55
Число оборотов вентилятора /максимальное/	3500 об/мин
Мощность приводного электромотора	850 кВт
Число оборотов приводного электродвигателя /максимальное/	1100 об/мин
Число М потока в рабочей части:	
максимальное	0,85
минимальное	0,05

Гиперзвуковая аэродинамическая труба ТТ – высокотемпературная, периодического действия. Схема рабочей части ТТ представлена на рис. 6, фотография внешнего вида рабочей части – на рис. 7, основные технические характеристики ТТ сведены в табл. 4.

ТТ представляла собой сложнейшее техническое сооружение, включавшим ряд инженерных систем для обеспечения ее работы: электропитания (большой мощности), регулирования давления, подачи воздуха высокого и низкого давления, водяного охлаждения и др. Особо сложным элементом ТТ являлся электродуговой подогреватель.

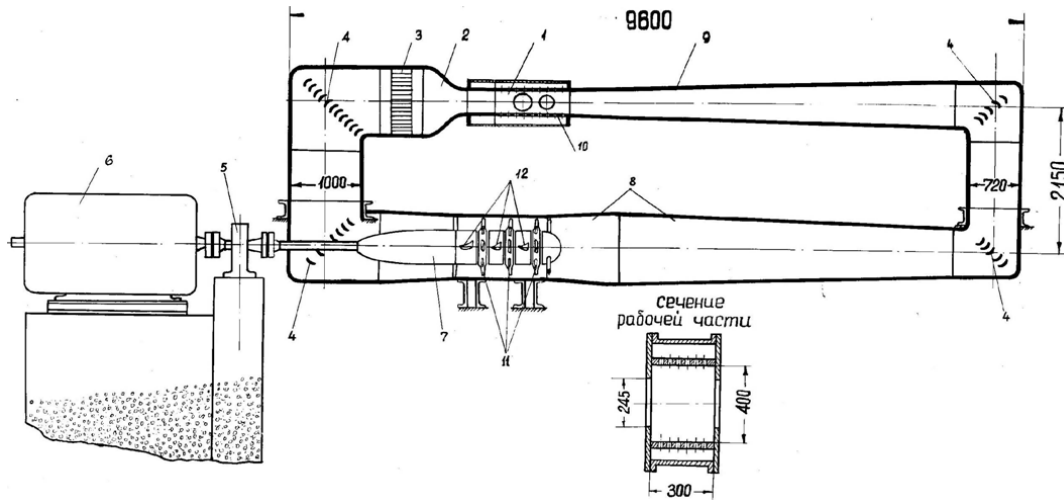


Рис. 3. Аэродинамический контур трансзвуковой аэродинамической трубы СТ:

- 1 – рабочая часть; 2 – сопло; 3 – воздушно-водяной радиатор; 4 – поворотные лопатки; 5 – мультипликатор; 6 – приводной электромотор; 7 – задний обтекатель; 8 – отсеки обратного канала; 9 – диффузор; 10 – перфорированные стенки; 11 – вентилятор; 12 – спрямляющий аппарат

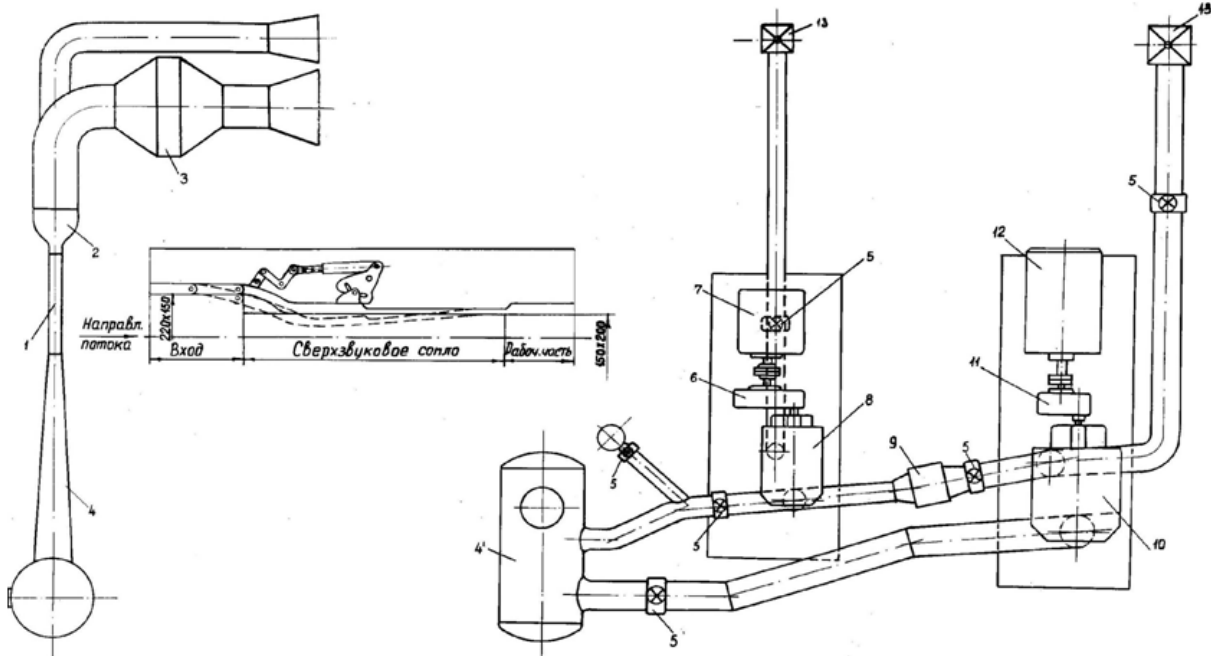


Рис. 4. Схема сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ:

- 1 – рабочая часть; 2 – дозвуковое сопло; 3 – силикагелевый осушитель; 4 – диффузор; 4' – ресивер; 5 – задвижка; 6, 11 – мультипликатор; 7, 12 – электродвигатель; 8, 10 – эксгаустер; 9 – воздушно-водяной радиатор; 10 – перфорированные стенки; 13 – выхлопные колпаки

Таблица 4

Основные технические данные  
гиперзвуковой аэродинамической трубы ТТ

Расход воздуха:	
через эжектор 1	0,5 кг/с
через эжектор 2	4,5 кг/с
через подогреватель	0,01-0,04 кг/с
Давление горячего воздуха	20 атм
Давление в рабочей части	0,5-0,2 мм.рт.ст.абс
Температура воздуха в подогревателе	200-3500 К
Число М потока в рабочей части	5-10
Скорость потока в рабочей части	2000-3000 м/с
Мощность электрической дуги	450 кВт
Время непрерывной работы	60 сек

По состоянию на 2015 год:

– ограниченно эксплуатируется АДТ Т-1, получившая наименьшие повреждения. Так, запуск аэродинамической трубы осуществляется нештатно по причине отсутствия части кабелей системы управления, требует мелкого ремонта система измерения скорости, аэродинамические весы разбалансированы, неработоспособны. Эти повреждения не носят критический характер, работоспособность аэродинамической трубы Т-1 может быть восстановлена в короткие сроки, стоимость восстановления, регулировки, сертификации для внутреннего использования ничтожна;

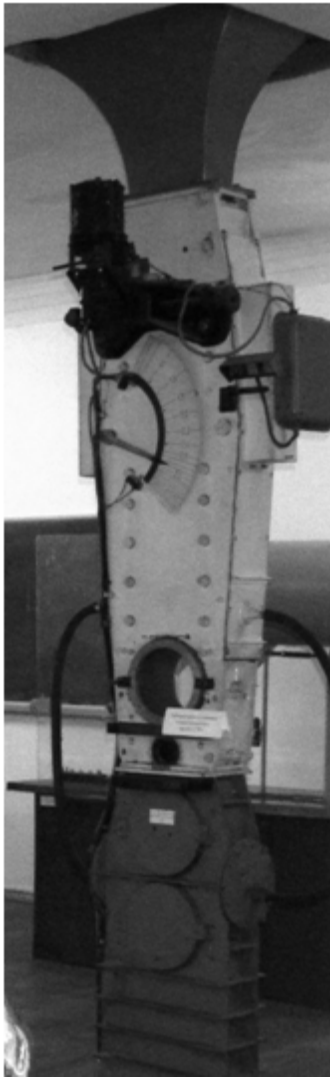


Рис. 5. Фотография внешнего вида рабочей части сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ

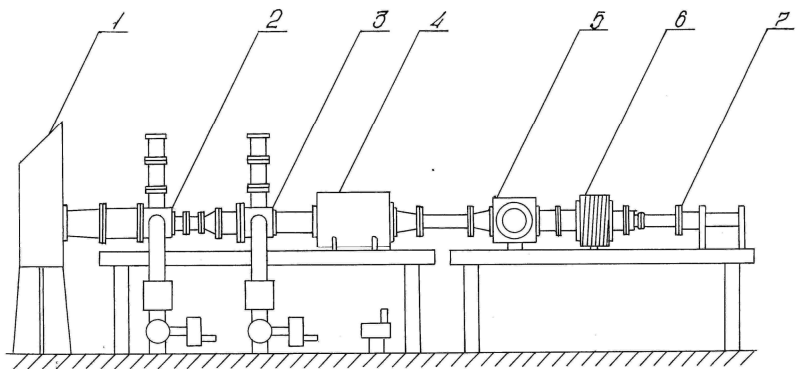


Рис. 6. Схема рабочей части гиперзвуковой аэродинамической трубы ТТ:  
1 – выхлопное устройство; 2-3 – эжектор; 4 – холодильник;  
5 – рабочая часть; 6 – катушка магнитного поля; 7 – электрод

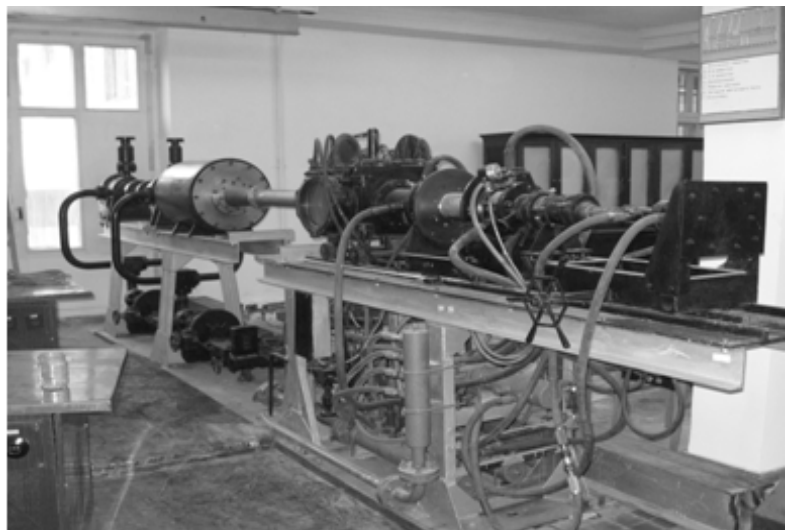


Рис. 7. Фотография внешнего вида рабочей части гиперзвуковой аэродинамической трубы ТТ

– все элементы трансзвуковой аэродинамической трубы СТ сданы в металлолом, что полностью исключило возможность проведения экспериментальных исследований в наиболее важном для военной и гражданской авиации трансзвуковом диапазоне скоростей полета. Следует отметить, что в Украине экспериментальные исследования в этом диапазоне скоростей могут проводиться в аэродинамической трубе Т-6 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», внесенной в реестр научных объектов, представляющих собой национальное достояние, однако Т-6, с отличием от СТ, является установкой периодического действия;

– баллонная система аэродинамической трубы ТТ, системы подогрева рабочего тела, управления, выхлопная система сданы в металлолом, рабочая часть повреждена, неработоспособна. Таким образом, без весьма дорогостоящего ремонта и/или глубокой модернизации возможность проведения экс-

периментальных исследований в гиперзвуковом диапазоне скоростей полета исключена, аналогов ТТ в Украине нет;

– сдан в металлолом вспомогательный эксгаустер сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ с системой питания, критично повреждены система запуска, система управления, при попытке сдать в металлолом повреждены основной эксгаустер (рис. 8), электродвигатель мощностью 1 МВт (рис. 9).

Такой характер повреждений, разумеется, не позволяет проводить экспериментальные исследования в сверхзвуковом диапазоне скоростей полета, при этом восстановительный ремонт не целесообразен. Альтернативой восстановительному ремонту является модернизация СЗТ, цель которой – снижение эксплуатационных затрат – будет достигнута отказом от непрерывного действия аэродинамической трубы с переходом на периодическое действие.

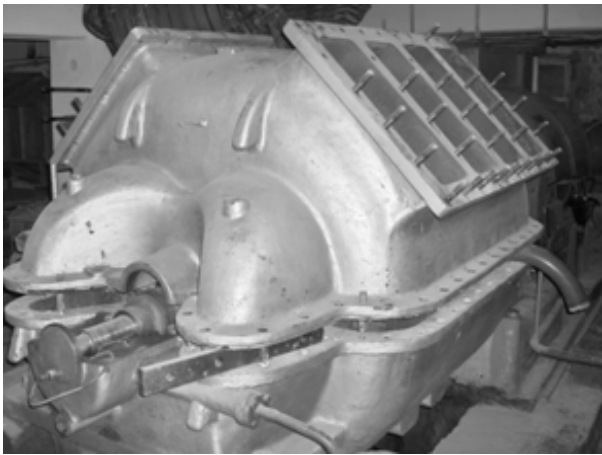


Рис. 8. Фотография внешнего вида поврежденный основного эксгаустера сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ



Рис. 9. Фотография внешнего вида электродвигателя основного эксгаустера сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ

Создание сверхзвуковых и гиперзвуковых потоков в классических трубах требует огромных энергетических мощностей. Так, для испытания моделей длиной порядка 1 м необходима электрическая мощность до 800 МВт. Поэтому при гиперзвуковых скоростях наиболее широкое распространение получили аэродинамические трубы и высокоэнтальпийные установки импульсного типа: АДТ периодического действия, АДТ Людвига, АДТ с разрядной камерой, АДТ адиабатического сжатия, ударные АДТ, ударные АДТ с тяжелым поршнем. Анализ преимуществ и недостатков этих установок представлен в работе [8]. Следует полагать, что наименьшая стоимость модернизации, обусловленная простотой конструкции и наличием оставшихся элементов СЗТ, будет при принятии схемы Людвига.

АДТ Людвига – ударная труба импульсного типа, используемая для проведения испытаний моделей в широком диапазоне чисел Маха ( $M=0,2-10$ ). АДТ Людвига состоит из форкамеры – длинного

канала высокого давления (не обязательно прямого и постоянного поперечного сечения), сопла Лавала, рабочей части с поддерживающими модель механизмами, диффузора и вакуумной ёмкости. Следует отметить, что все оставшиеся элементы СЗТ могут быть использованы, более того, длинный канал форкамеры, являвшийся недостатком для АДТ непрерывного действия, позволит получить несколько большее время стационарной работы АДТ импульсного типа.

Необходимым элементом модернизируемой АДТ является быстродействующий клапан (или диафрагма), который устанавливается перед соплом или за рабочей частью. АДТ Людвига приводится в действие открытием быстродействующего клапана (разрывом диафрагмы). Картина течения в рабочей части сохраняется практически неизменной в течение промежутка времени, за который волны разрежения, распространяясь по форкамере, достигают торцевой стенки и, отразившись от неё, возвращаются к входу в сопло. Продолжительность стационарного (рабочего) течения в основном определяется длиной канала и скоростью звука в газе, которым заполнен канал.

В существующих установках время стационарной работы исчисляется несколькими десятками долями секунды, что достаточно для проведения аэродинамических испытаний.

Для обеспечения гиперзвуковой скорости потока в рабочей части газ в канале может быть нагрет электрическим подогревателем до температуры, гарантирующей отсутствие его конденсации в рабочей части.

Таким образом, модернизация сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ заключается в оснащении ее быстродействующим клапаном, вакуумным насосом малой мощности, быстродействующей измерительной системой. Схема модернизированной СЗТ представлена на рис. 10.

## Выводы

Проведение модернизации сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ позволит возобновить экспериментальные аэродинамические исследования сложных пространственных компоновок летательных аппаратов в сверхзвуковом диапазоне скоростей потока. Снижение эксплуатационных затрат при этом достигается использованием имеющихся в наличии элементов СЗТ, теневых приборов ИАБ-451 (рис. 11), а, главное, отказом от непрерывного действия аэродинамической трубы с переходом на периодическое действие.

В дальнейшей работе предполагается теоретическое обоснование основных технических характеристик модернизируемой сверхзвуковой аэродинамической трубы СЗТ.

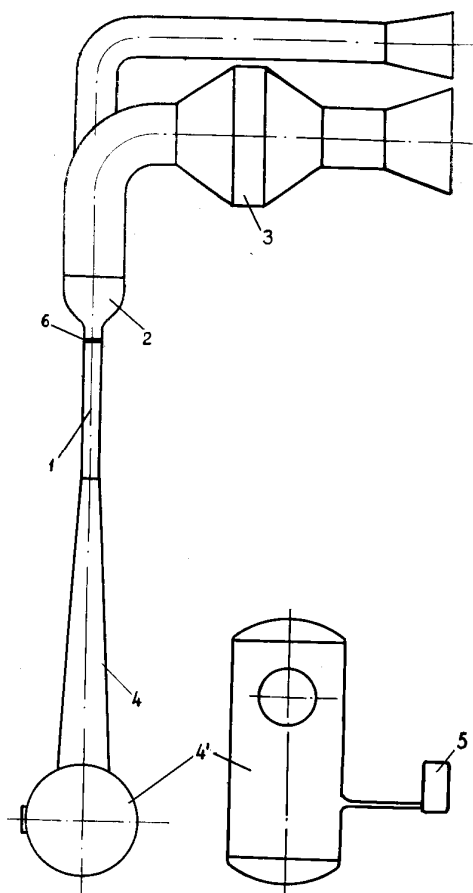


Рис. 10. Схема модернізованої сверхзвукової аеродинамічної труби СЗТ:

- 1 – робоча частина; 2 – дозвукове сопло;  
3 – електричний підогревател; 4 – диффузор;  
4' – ресивер; 5 – вакуумний насос малої потужності;  
6 – швидкодіючий клапан (діафрагма)

### Список литературы

1. Степанов Ю.Г. Приближенный метод расчета оптимального положения элементов многоцелевой механизации на крыловом профиле [Текст] / Ю.Г. Степанов // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: Изд. отд. ЦАГИ. – 1975. – Вып. 1695. – 25 с.
2. Золотко Е.М. Подъемная сила крыла, обдуваемого струей от винтов, при изменении коэффициента нагрузки на ометаемую винтом площадь от 0 до  $\infty$

### МОДЕРНІЗАЦІЯ НАДЗВУКОВОЇ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ТРУБИ ХАРЬКОВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ ПОВІТРЯНИХ СИЛ

Є.О. Українець

Представлено аналіз технічного стану комплексу аеродинамічних труб Харківського університету Повітряних Сил. Зроблено висновок про неможливість проведення відновлюваного ремонту аеродинамічних труб великих швидкостей. Розроблено варіант модернізації надзвукової аеродинамічної труби СЗТ для відновлення експериментальних аеродинамічних досліджень. Зниження експлуатаційних витрат досягається відмовою від безперервної дії аеродинамічної труби з переходом на періодичну дію.

**Ключові слова:** аеродинамічна труба, модернізація, аеродинамічні характеристики, технічні характеристики, модельний експеримент.

### MODERNIZATION OF THE SUPERSONIC WIND TUNNEL OF KHARKIV UNIVERSITY OF AIR FORCES

E.A. Ukrainets

An analysis of the technical state of a complex of wind tunnels of Kharkiv University of Air Forces is presented. The conclusion about impossibility of carrying out repairing of high speeds wind tunnels is made. A variant of modernization of the supersonic wind tunnel of SWT is developed in order to resume the experimental aerodynamic research. The reduction in operating costs is achieved by the refusal of continuous operation of the wind tunnel with the transition to a periodic action.

**Keywords:** a wind tunnel, modernization, aerodynamic characteristics, technical characteristics, a model experiment.



Рис. 11. Схема модернізованої сверхзвукової аеродинамічної труби СЗТ

[Текст] / Е.М. Золотко // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: Изд. отд. ЦАГИ, 1984. – Вып. 2235. – С. 3-10.

3. Борин А.А. Влияние обдувки частей самолета струей от винта на характеристики взлета и разбега [Текст] / А.А. Борин // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – М.: Изд. отд. ЦАГИ, 1970. – Вып. 1278. – 16 с.

4. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов [Текст] / Под ред. Г.С. Бюшгенга. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 816 с.

5. Методы аэрофизических исследований в полете [Текст] / [А.Д. Миронов, А.И. Зямтин, А.А. Королев и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 112 с.

6. Летные испытания самолетов [Текст] / [М.Г. Котик, А.В. Павлов, И.М. Пашиковский, Н.Г. Щитаев]. – М.: Машиностроение, 1978. – 423 с.

7. Анико О.Б. Аэродинамический облик, радиолокационная и инфракрасная заметность самолетов военного назначения при их обнаружении: монография [Текст] / О.Б. Анико, В.Г. Башинский, Е.А. Украинец. – Запорожье: АО «Моторсич», 2013. – 250 с.

8. Харитонов А.М. Техника и методы агрофизического эксперимента: [Текст] / А.М. Харитонов – Н-ск: НГТУ, 2005. – Ч. 1: Аэродинамические трубы и газодинамические установки. – 220 с.

Поступила в редколлегию 1.12.2014

**Рецензент:** канд. техн. наук проф. Ю.І. Миргород, Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.