

**Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик  
летательного аппарата в сверхзвуковой аэродинамической трубе СТ-3  
с использованием программно-аппаратного комплекса**

**Ротэрмель А.Р.\*, Яшков С.А.\*, Шевченко В.И.\***

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,*

*ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

*\*e-mail: vka@mil.ru*

***Статья поступила 13.07.2021***

**Аннотация**

В статье рассмотрен разрабатываемый программно-аппаратный комплекс для проведения весовых экспериментов с помощью тензометрических весов (З-КВТ) позволяющий автоматически проводить запуск сверхзвуковой аэродинамической трубы СТ-3 (САТ СТ-3) и замер сил, воздействующих на модель летательного аппарата (ЛА), на протяжении всего времени работы САТ СТ-3.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием САТ СТ-3 в аэродинамической лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая аэродинамическая труба, программно-аппаратный комплекс, тензометрические весы.

**Введение**

Сверхзвуковая аэродинамическая труба СТ-3 широко используется для моделирования аэродинамических явлений при больших числах Маха (М).

Лабораторно-экспериментальная установка САТ СТ-3 позволяет получить сверхзвуковые потоки в диапазоне  $1,5 \leq M_{\infty} \leq 4,2$ .

В настоящее время в САТ СТ-3 получают наиболее достоверные экспериментальные данные для исследования силы, действующей на модель, при взаимодействии с набегающим потоком модели ЛА различной геометрической формы. Для обеспечения исследований аэродинамических характеристик (АХ) модели ЛА в САТ СТ-3 возникает вопрос разработки, внедрения и использования современных измерительных технологий, которые позволят расширить спектр проводимых экспериментальных исследований. Одним из видов проведения аэродинамических испытаний является весовой эксперимент [1].

В данной работе представлены результаты разработки, внедрения и применения программного аппаратного комплекса (ПАК) для проведения весовых экспериментов в САТ СТ-3 с помощью трехкомпонентных тензометрических весов (3-КВТ).

### **Постановка задачи эксперимента**

Экспериментальная модель ЛА удобообтекаемой формы крепится на державке тензометрических весов 3-КВТ, помещенных в рабочую часть САТ СТ-3.

К тензометрическим весам 3-КВТ подключается кабель сопряжения с ПАК САТ СТ-3.

В состав ПАК САТ СТ-3 входит:

1. Трехкомпонентные тензометрические весы 3-КВТ.
2. Крейтовая система LTR компании L-Card.
3. Устройство питания, сопряжения и настройки тензометрических датчиков.
4. Персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ).

## 5. Программный комплекс.

Структурная схема ПАК в составе САТ СТ-3 представлена на рис. 1.

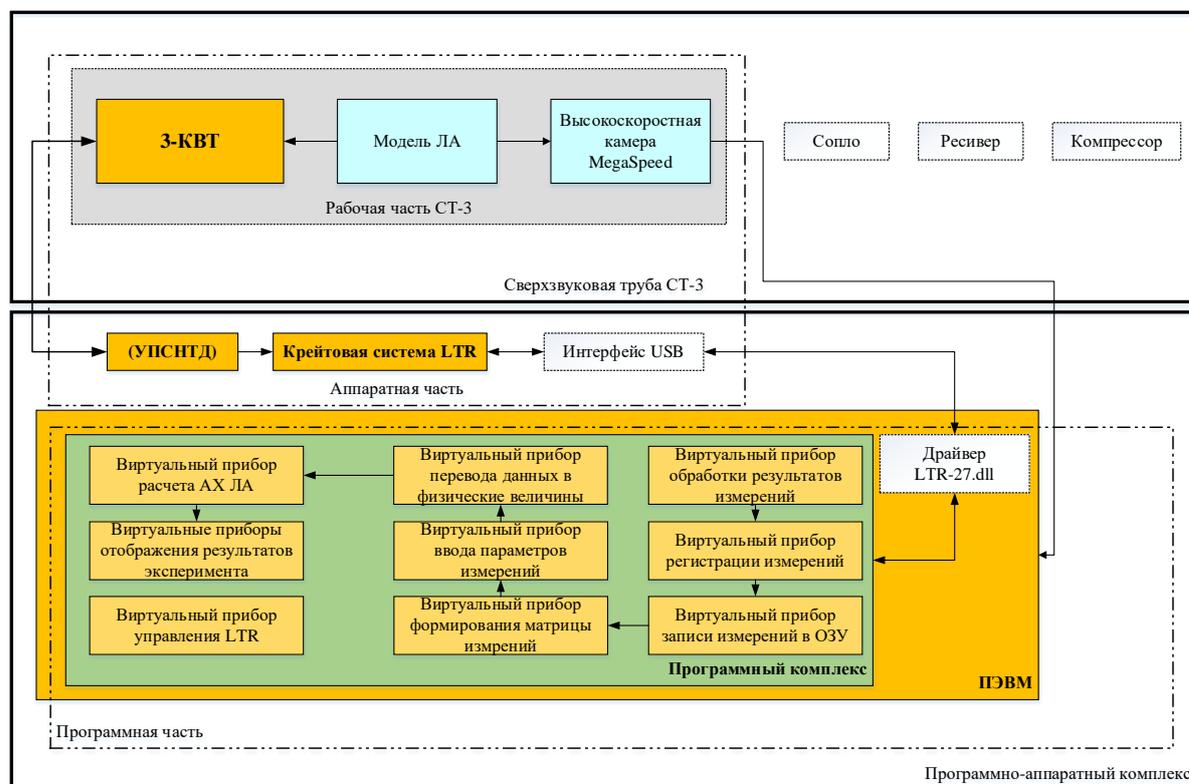


Рис. 1. Структурная схема ПАК в составе СТ-3.

На рис. 2 представлен внешний облик САТ СТ-3 с установленными в рабочей части тензометрическими весами 3-КВТ. На тензометрических весах 3-КВТ с державкой и обтекателем крепится экспериментальная модель ЛА (рис.2).

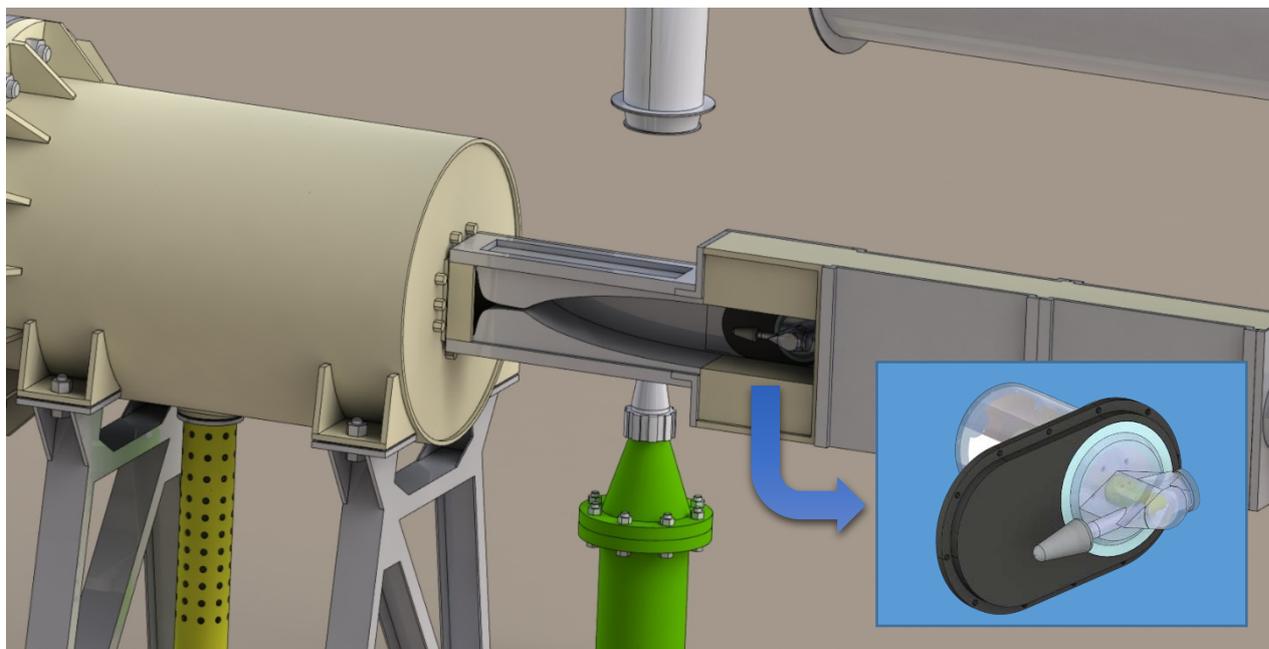


Рис. 2. Место крепления модели на 3-КВТ в САТ СТ-3



а)



б)

Рис. 3. Сверхзвуковая аэродинамическая труба СТ-3

а) Вид САТ СТ-3 со стороны иллюминатора;

б) Вид САТ СТ-3 со стороны тензометрических весов 3-КВТ.

Тензометрические весы 3-КВТ для измерения продольной  $X$ , нормальной  $Y$  сил, а также момента тангажа  $M_z$ . На рисунке 4 представлен общий вид тензометрических весов 3-КВТ в составе САТ СТ-3. Упругие элементы для измерения осевой силы  $X$  и нормальной силы  $Y$  выполнены в виде прямоугольных пластин расположенных

перпендикулярно направлению действия силы. На упругие элементы, которых наклеены тензорезисторы.

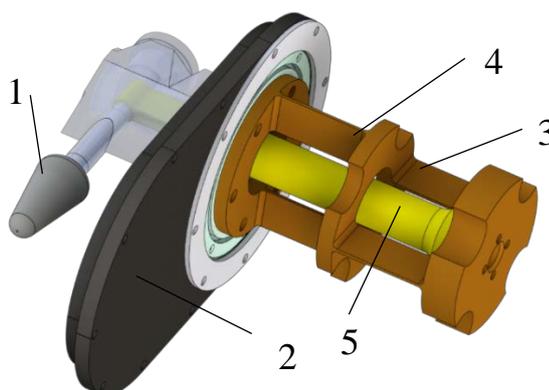


Рис. 4. Тензометрические весы 3-КВТ САТ СТ-3

1 – экспериментальная модель летательного аппарата; 2 – крышка крепления тензометрических весов 3-КВТ; 3 – весовой элемент Y; 4 – весовой элемент X; 5 – весовой элемент  $M_z$ .

Основные характеристики САТ СТ-3 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики САТ СТ-3

Наименование	Обозначение	Величина
Скоростной напор, кПа	$p_\infty$	до 952,63
Продолжительность установившегося течения	T	непрерывного действия
Число Маха	M	1; 2; 2,5; 3; 3,6; 4; 4,2
Число Рейнольдса	Re	$3,4 \dots 20,4 \times 10^5$
Диапазон углов атаки, град	A	$-10^0 \dots 10^0$
Температура торможения, $K^0$	T	273
Размеры рабочей части, мм		150x120

Перед проведением экспериментальных исследований по определению сил, действующих на модель ЛА при взаимодействии с набегающим потоком, проводится тарировка тензометрических весов 3-КВТ [18, 19].

По результатам тарировки тензометрических весов 3-КВТ строятся зависимости и вычисляются функции преобразования сил, действующих на модель ЛА, в код напряжения. Зависимость сил от измеряемого напряжения при тарировке тензометрических весов 3-КВТ представлена на рис. 5.

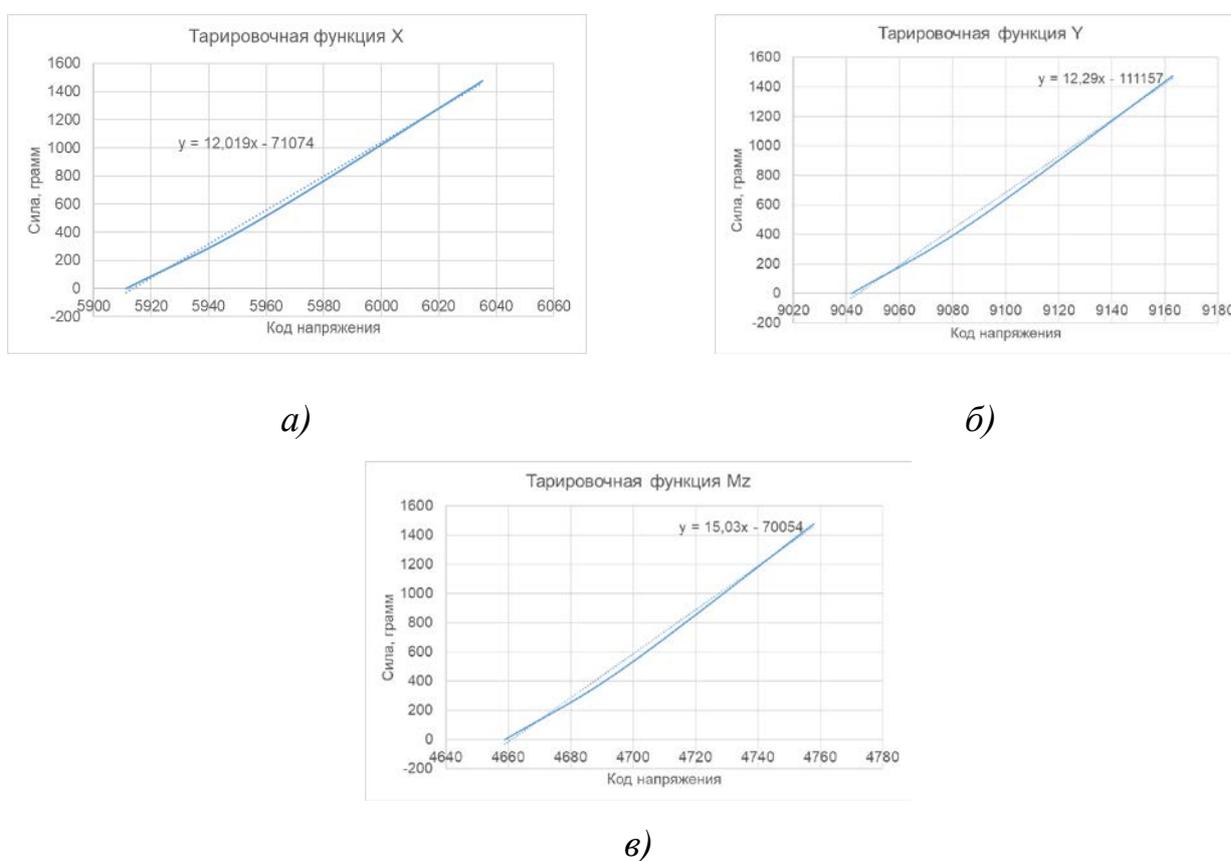


Рис. 5. Тарировочные характеристика и функции тензометрических весов 3-КВТ САТ СТ-3 по каналам чувствительности:

а) осевой силы, б) нормальной силы, в) момента тангажа.

Для подключения тензометрических весов 3-КВТ к крейтовой системе LTR разработано устройство сопряжения и аналоговой настройки электрической схемы, которая изображена на рис. 6 [19].

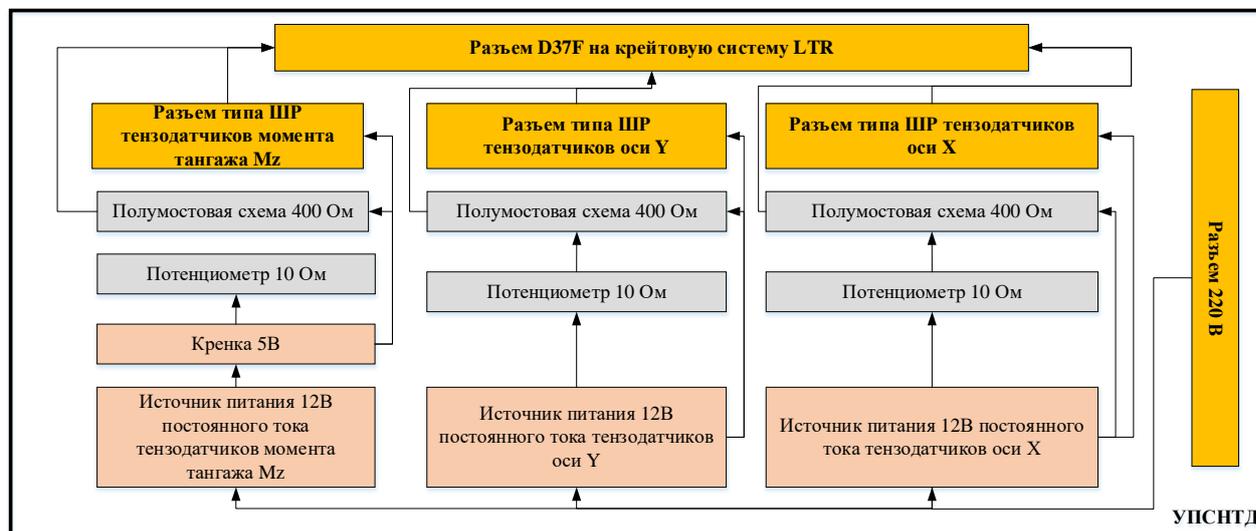


Рис. 6. Структурная схема устройства питания, сопряжения и настройки тензометрических датчиков

Для измерения напряжений использовалась крейтовая система LTR, которая предназначена для построения многоканальных измерительных систем ввода/вывода аналоговых и цифровых данных на базе LPC4337 (двухъядерного процессора CortexM4/CortexM0) с объёмом ОЗУ 32 МБ и интерфейсом USB 2.0. Крейтовая система LTR основана на модуле LTR212 оснащённом субмодулями Н27Т, которые предназначены для использования в задачах прецизионной тензометрии. Модуль LTR212 может быть реализован в различных схемах подключения (до 8-ми тензодатчиков сопротивлением от 100 до 1000 Ом) при проведении статических и динамических измерений. Внешний облик крейтовой системы LTR представлен на рис. 7 [15].



Рис. 7. Внешний облик крейтовой системы LTR

Программный комплекс выполнен в среде графического программирования LabVIEW, которая представляет собой среду прикладного графического программирования, используемую в качестве стандартного инструмента для проведения измерений, анализа их данных и последующего управления приборами и исследуемыми объектами. ПЭВМ, оснащенная измерительно-управляющей аппаратной частью и LabVIEW, позволяет автоматизировать процесс получения экспериментальных результатов физических исследований. Создание программы отличается большой простотой, поскольку исключает множество синтаксических деталей [2, 15].

На рисунках 8 – 10 представлен пример результатов проведения весовых экспериментов модели ЛА при  $M_\infty=4,2$  и углах атаки  $\alpha=0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ .

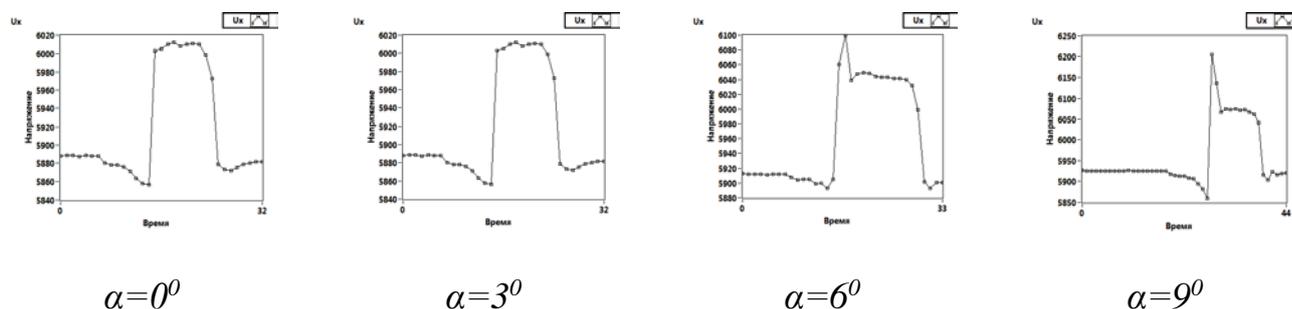
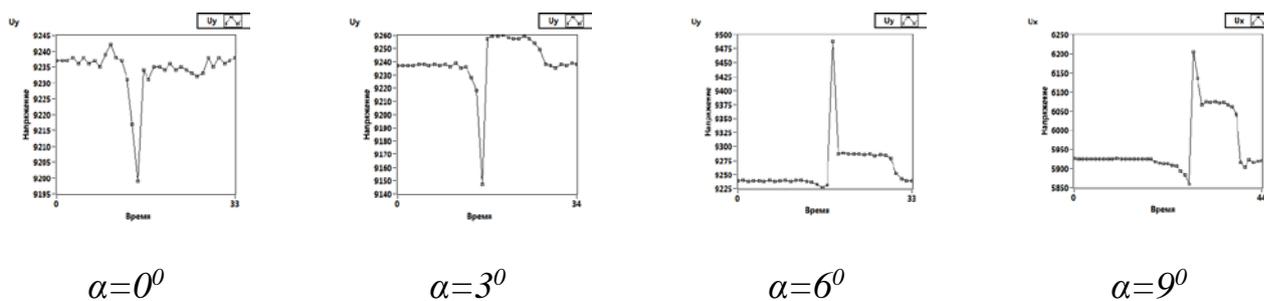
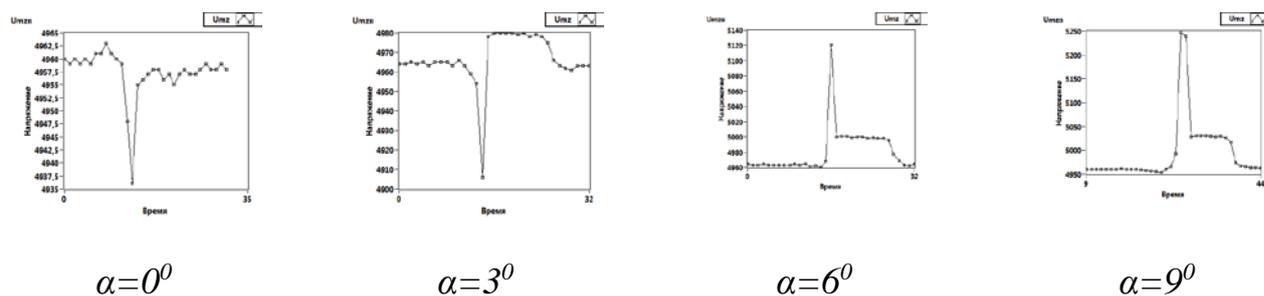


Рис. 8. Осциллограммы измерений аэродинамической продольной силы X

Рис. 9. Осциллограммы измерений аэродинамической нормальной силы  $Y$ Рис. 10. Осциллограммы измерений аэродинамического момента  $M_z$ 

Система измерения сил, действующих на модель при взаимодействии с набегающим потоком, на основе ПАК позволяет определять экспериментальные значения продольной  $X$ , нормальной  $Y$  и поперечной  $Z$  сил, по значению которых определяются соответствующие безразмерные аэродинамические коэффициенты модели ЛА ( $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$ ,  $M_z$ ,  $K$ ,  $X_d$ ) [11-13]. Зависимость аэродинамических коэффициентов от угла атаки  $\alpha$  в связанной системе координат представлена на рис.11.

Экспериментальные исследования, проводимые на САТ СТ-3 аэродинамической лаборатории ВКА имени А.Ф.Можайского, позволяют более полно изучать воздействие аэродинамических сил на модели ЛА с возможностью верификации численных моделей для расширения области исследования.

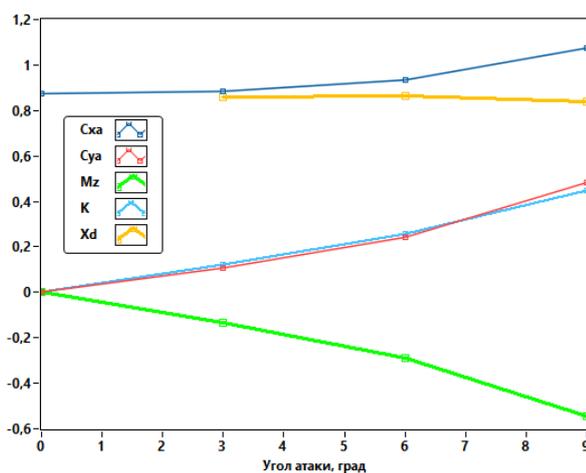


Рис. 12. Зависимости аэродинамических коэффициентов модели от углов атаки по результатам проведения эксперимента ( $M_\infty = 4,2$ )

### Заключение

В результате выполненных экспериментальных исследований по определению аэродинамических характеристик модели ЛА на сверхзвуковой аэродинамической трубе СТ-3 задействование программно-аппаратного комплекса показало свою эффективность [7-9].

Эффективность используемого программно-аппаратного комплекса в составе САТ СТ-3 заключается в возможности построения графиков в реальном времени, получение значений аэродинамических коэффициентов в виде табличных данных. Внедрение программно-аппаратного комплекса позволило сократить время подготовки, проведения и составления отчетов по проводимым экспериментальным исследованиям в два раза.

Результаты анализа экспериментальных данных, полученных с помощью разработанного ПАК САТ СТ-3, хорошо согласуются с результатами, полученными

другими авторами [3-6, 20], что позволяет говорить о высокой степени достоверности полученных результатов.

### Библиографический список

1. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD, La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998, 537 p.
2. Бутырин П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе Lab VIEW 7. - М.: ДМК Пресс, 2005. - 264 с.
3. Ковалев П.И., Менде Н.П. Альбом сверхзвуковых течений. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – 251 с.
4. Биматов В.И., Савкина Н.В., Фарапов В.В. Сверхзвуковое обтекание и аэродинамические характеристики острого конуса для различных моделей турбулентности // Вестник Томского государственного университета. 2016. № 5 (43). С. 35 - 42. DOI: [10.17223/19988621/433/4](https://doi.org/10.17223/19988621/433/4)
5. Босняков С.М., Коваленко В.В., Михайлов С.В., Ремеев Н.Х. Численное решение задачи обтекания трапециевидного клина сверхзвуковым потоком идеального газа // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. 20. № 1. С. 30 - 39.
6. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С. Численное моделирование взаимодействия поперечной струи со сверхзвуковым потоком с использованием различных моделей турбулентности // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 5. С. 789 - 798. DOI: [10.15372/PMTF20150505](https://doi.org/10.15372/PMTF20150505)

7. Головкин М.А., Головкина Е.В. Визуализация структур течения в окрестности моделей летательных аппаратов в гидродинамической трубе малых скоростей (самолетные аэродинамические компоновки) // Труды МАИ. 2016. № 90. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=74692>

8. Дуганов В.В., Иванов М.Я. Сверхзвуковое обтекание боковой кромки половины клина // Ученые записки ЦАГИ. 1977. Т. 8. № 6. С. 132 - 137.

9. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. - М.: Изд-во МАИ, 2001. - 57 с.

10. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н. и др. Аэродинамика тел вращения. – М.: Машиностроение, 1964. - 573 с.

11. Краснов Н.Ф. Прикладная аэродинамика. - М.: Высшая школа, 1974. – 732 с.

12. Луценко А.Ю., Столяров Е.Г., Чернуха П.А. Струйное управление параметрами обтекания летательных аппаратов различных назначений // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 212. С. 28 - 44.

13. Мельников А.П. Аэродинамика больших скоростей. - М.: Воениздат, 1961. - 424 с.

14. Смирнова С.И., Пахов В.В., Степанов Р.П. и др. Оценка и минимизация влияния различных поддерживающих устройств на интегральные аэродинамические характеристики моделей тел вращения и изолированных фюзеляжей вертолетов в аэродинамической трубе малых скоростей // Труды МАИ. 2014. № 73. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=48465>

15. Пашенцев В.Н., Струков Ю.Н. Измерительный комплекс на основе персонального компьютера и измерительных модулей. - М.: МИФИ, 2009. - 48 с.

16. Петров К.П. Аэродинамика тел простейших форм. - М.: Факториал, 1998. - 432 с.
17. Самохвалов Н.Ю. Установка для аэродинамического исследования лопаток турбин // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49297>
18. Тарасенко О.С., Бодрышев В.В., Абашев В.М. Метод цифровой обработки теневых снимков сверхзвукового обтекания элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62032>
19. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Часть 2. Методы и средства аэрофизических измерений. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 456 с.
20. Чорный А.Д., Чичко А.Н., Жукова Ю.В., Кухарчук И.Г., Мелец А.Ф., Малкин В.А. Верификация физико-математической модели расчета аэродинамических характеристик плохообтекаемых тел, движущихся в воздухе при больших числах Маха // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 3. С. 42 - 47.

## **Experimental study of aerodynamic characteristics in a supersonic wind tunnel ST-3 using a software and hardware complex**

**Rotermel A.R.\*, Yashkov S.A.\*, Sevchenko V.I.\***

*Mozhaisky Military Space Academy,*

*13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

*\*e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)*

### **Abstract**

The article considers the developed software and hardware complex for conducting weight experiments with the help of strain gauges, which allows automatically launching and measuring the forces acting on the model of the aircraft throughout the entire operation time of the supersonic wind tunnel.

Experimental studies were carried out using a supersonic wind tunnel of the aerodynamic laboratory of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky.

Currently, the supersonic wind tunnel provides the most reliable data on the study of the force acting on the model when interacting with the incoming flow of aircraft of various geometric shapes. To ensure the study of the aerodynamic characteristics of aircraft in a supersonic wind tunnel, the question arises of the development, implementation and use of modern measurement technologies that will expand the range of experimental studies. One of the types of conducting aerodynamic tests is a weight experiment.

This paper presents the results of the development, implementation and application of a software and hardware complex for conducting weight experiments in a supersonic wind tunnel using three-component strain gauges.

The software package is implemented in the LabVIEW graphical programming environment, which is an application graphical programming environment used as a standard tool for conducting measurements, analyzing their data, and then controlling devices and objects under study. A computer equipped with measurement and control hardware and LabVIEW allows you to fully automate the process of physical research. Creating any program is very simple, because it eliminates many syntactic details.

The system for measuring the forces acting on the model in interaction with the incoming flow, based on the software and hardware complex, allows you to determine the experimental values of the longitudinal  $X$ , normal  $Y$  and transverse  $Z$  forces, the value of which determines the corresponding dimensionless aerodynamic coefficients of the model ( $C_x$ ,  $C_{ya}$ ,  $M_z$ ,  $K$ ,  $X_d$ ).

Because of the conducted experimental studies on a supersonic wind tunnel with the use of a software and hardware complex, it has shown its effectiveness. The efficiency lies in the possibility of plotting graphs in real time, obtaining the values of the aerodynamic coefficients in tabular data. Because of the implementation of the software and hardware complex, it allowed to reduce the time for preparing, conducting and compiling the report of the conducted experimental studies by half.

**Keywords:** supersonic wind tunnel, hardware and software complex, strain gauge scales.

## References

1. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*, La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998, 537 p.
2. Butyrin P.A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: komp'yuternye izmereniya i virtual'nye pribory na osnove Lab VIEW 7* (Automation of physical research and experiment: computer measurements and virtual devices based on Lab VIEW 7), Moscow, DMK Press, 2005, 264 p.
3. Kovalev P.I., Mende N.P. *Al'bom sverkhzvukovykh techenii* (Album of supersonic currents), Saint Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2011, 251 p.
4. Bimatov V.I., Savkina N.V., Farapov V.V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 5 (43), pp. 35 - 42. DOI: [10.17223/19988621/433/4](https://doi.org/10.17223/19988621/433/4)
5. Bosnyakov S.M., Kovalenko V.V., Mikhailov S.V., Remeev N.Kh. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1989, vol. 20, no 1, pp. 30 - 39.
6. Volkov K.N., Emel'yanov V.N., Yakovchuk M.S. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2015, vol. 56, no. 5, pp. 789 - 798. DOI: [10.15372/PMTF20150505](https://doi.org/10.15372/PMTF20150505)
7. Golovkin M.A., Golovkina E.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74692>
8. Duganov V.V., Ivanov M.Ya. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1977, vol. 8, no. 6, pp. 132 - 137.
9. Znamenskaya I.A., Gvozdeva L.G., Znamenskii N.V. *Metody vizualizatsii v mekhanike gaza* (Visualization methods in gas mechanics), Moscow, Izd-vo MAI, 2001, 57 p.
10. Krasnov N.F., Koshevoi V.N., Danilov A.N. et al. *Aerodinamika tel vrashcheniya* (Aerodynamics of bodies of rotation), Moscow, Mashinostroenie, 1964, 573 p.

11. Krasnov N.F. *Prikladnaya aerodinamika* (Applied aerodynamics), Moscow, Vysshaya shkola, 1974, 732 p.
12. Lutsenko A.Yu., Stolyarov E.G., Chernukha P.A. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, 2015, no. 212, pp. 28 - 44.
13. Mel'nikov A.P. *Aerodinamika bol'shikh skorostei* (High-speed aerodynamics), Moscow, Voenizdat, 1961, 424 p.
14. Smirnova S.I., Pakhov V.V., Stepanov R.P. et al. *Trudy MAI*, 2014, no. 73. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48465>
15. Pashentsev V.N., Strukov Yu.N. *Izmeritel'nyi kompleks na osnove personal'nogo komp'yutera i izmeritel'nykh modulei* (Measuring complex based on a personal computer and measuring modules), Moscow, MIFI, 2009, 48 p.
16. Petrov K.P. *Aerodinamika tel prosteishikh form* (Aerodynamics of bodies of the simplest shapes), Moscow, Faktorial, 1998, 432 p.
17. Samokhvalov N.Yu. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49297>
18. Tarasenko O.S., Bodryshev V.V., Abashev V.M. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62032>
19. Kharitonov A.M. *Tekhnika i metody aerofizicheskogo eksperimenta. Chast' 2. Metody i sredstva aerofizicheskikh izmerenii* (Techniques and methods of the aerophysical experiment. Part 2. Methods and means of aerophysical measurements), Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2007, 456 p.
20. Chornyi A.D., Chichko A.N., Zhukova Yu.V., Kukharchuk I.G., Melets A.F., Malkin V.A. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika*, 2018, no. 3, pp. 42 - 47.