

Разработка и применение роторных имитаторов двигателей для моделирования силовых установок при проведении аэродинамического эксперимента

ГП «Антонов»

Рассмотрены основные методы моделирования силовых установок аэродинамических моделей, принцип работы и особенности конструкции роторных имитаторов двигателей, а также особенности конструкции аэродинамических моделей с моделированием работы силовой установки.

Ключевые слова: силовая установка, аэродинамическая модель, метод моделирования, имитатор двигателя, эксперимент.

1. Основные методы моделирования силовых установок аэродинамических моделей

Непрерывный рост энерговооруженности самолетов предопределяет все большую роль силовой установки в обеспечении высоких летно-технических данных ЛА. Применение ТРДД с большой и, особенно, со сверхбольшой степенью двухконтурности, а также использование энергетических систем увеличения подъемной силы вызывают необходимость моделирования работы силовой установки при проведении исследований моделей самолетов в аэродинамических трубах.

Точное моделирование работы силовой установки самолета является одной из наиболее важных и сложных задач при проведении эксперимента в аэродинамических трубах.

Моделирование силовой установки означает воспроизведение рабочих параметров двигателя в соответствии с заданными условиями эксперимента. Одновременное воспроизведение всех рабочих параметров двигателя (полное подобие) с помощью малогабаритного имитатора, установленного на масштабированной аэродинамической модели, неосуществимо. Поэтому для моделирования используют устройства, воспроизводящие интегральные рабочие характеристики натурального двигателя при условии геометрического подобия модели:

- коэффициент тяги двигателя;
- коэффициент нагрузки на ометаемую винтом площадь;
- коэффициент расхода воздуха через воздухозаборник двигателя;
- поле скоростей на срезе сопла;
- поле скоростей за винтом;
- коэффициент выходного импульса реактивной струи. В зависимости от условий и особенностей аэродинамического эксперимента в качестве критериев подобия принимают числа Маха, Рейнольдса, Струхалья, Фруда, Нуссельта и др.

В настоящее время на ГП «Антонов» применяют следующие основные типы устройств для моделирования рабочих параметров силовой установки:

- проточная мотогондола;

- струйный имитатор;
- эжекторный имитатор двигателя;
- роторный имитатор двигателя с воздушной турбиной.

Сравнительный анализ имитаторов и их возможностей моделирования двигателей показан на рис. 1. Очевидно, что наиболее благоприятными характеристиками для моделирования двухконтурных и турбовинтовых двигателей обладают роторные имитаторы с воздушно-турбинным приводом.

Тип имитатора	Проточная мотогондола	Струйные устройства		Комбинация потока с выдувом	Эжекторные имитаторы	Отбор воздуха от воздухозаборника и выдув реактивной струи	Роторные имитаторы			
		с холодной реактивной струей	с горячей реактивной струей				с камерой смещения	с отдельным выхлопом	винтовые	
Параметры моделирования	Течение на входе	~	-	-	~	~	+	+	+	+
	Распределение давлений на выходе	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	Температура реактивной струи	-		+	-	-	-	-	Для наружного контура	+
	Удельная теплоемкость реактивной струи	-		+	-	-	-	-	Для наружного контура	+
	Газовая постоянная реактивной струи	-	-	+	-	-	-	-	Для наружного контура	+
	Коефициент выходного импульса C_m	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	Коефициент тяги C_p	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Применение	Внешние обводы ВРД	Моделирование реактивной струи ВРД, кроме ТВД	Моделирование реактивной струи ТРД и РД	Моделирование течения на входе и реактивной струи всех ВРД, кроме ТВД и ТВД	Моделирование всех ВРД, кроме ТВД	Моделирование ТРД и ДТРД	Моделирование ТРД и ДТРД	Моделирование ДТРД и ТВдД	Моделирование ТВД	

Рис. 1. Основные методы моделирования работы силовой установки

При использовании проточной мотогондолы точно воспроизводятся лишь внешние обводы силовой установки при подборе соответствующих дроссельных шайб – течение на входе в воздухозаборник и расход воздуха на фиксированном режиме. В то же время невозможно обеспечить полное моделирование струи, так как полное давление струи всегда меньше полного давления невозмущенного потока на величину потерь в воздухозаборнике и в канале гондолы двигателя.

Струйные имитаторы вполне применимы для моделирования ТРД, величина удельного расхода воздуха через воздухозаборник которых мала и течение на входе оказывает незначительное влияние на картину обтекания самолета.

Эжекторные имитаторы, которые дают возможность наряду с реактивной струей частично воспроизводить коэффициент расхода воздуха через воздухозаборник, применимы для моделирования ДТРД с малой степенью двухконтурности ($\leq 2,5$).

Роторные имитаторы маршевых двигателей с воздушно-турбинным приводом (ИМДВТ), использующие в качестве движителя малогабаритный компрессор, вентилятор или воздушный винт, позволяют точно воспроизводить различные режимы работы натурального двигателя, измерять изменение аэродинамического сопротивления и подъемной силы в зависимости от перепада

давлений на срезе сопла и оценивать взаимодействие двигателя с внешним потоком в присутствии модели самолета.

Роторные имитаторы двигателей, несмотря на сложность конструкции, являются наиболее эффективными при моделировании двухконтурных турбореактивных двигателей и турбовинтовых двигателей, особенно при исследовании взлетно-посадочных характеристик. Применение роторных имитаторов с воздушной турбиной позволяет повысить достоверность экспериментальных данных при исследовании моделей самолетов в аэродинамических трубах, в том числе при моделировании критических режимов полета, режимов реверсирования тяги, отработке компоновки самолетов укороченного взлета и посадки с энергетическими системами увеличения подъемной силы, а также при решении ряда других задач, возникающих на протяжении жизненного цикла самолета.

2. Принцип работы и особенности конструкции роторных имитаторов двигателей

Несмотря на общий принцип работы, в зависимости от типа моделируемого двигателя (турбореактивный или турбовинтовой) имитаторы двигателей имеют свои конструктивные особенности.

Роторный имитатор двухконтурного турбореактивного двигателя представляет собой модель силовой установки с расположенным внутри мотогондолы турбовентиляторным агрегатом (рис. 2). Внешние обводы мотогондолы, а также входная часть воздухозаборника до критического сечения, выполняют геометрически подобными натурной силовой установке. Профилировку проточной части вентиляторного контура от критического сечения воздухозаборника до среза сопла и газозаборного тракта турбинного контура проводят с увеличенными площадями проходных сечений для предотвращения заклинивания потока и с обеспечением геометрического подобия выходных площадей сопел вентиляторного и турбинного контуров. Сопла вентиляторного и турбинного контуров выполняют съемными, что позволяет менять их в зависимости от цели проведения испытаний (испытания реверса, исследования по снижению уровня шума).



Рис. 2. Имитатор турбовентиляторного двигателя

Сжатый воздух по каналам в пилоне и внутреннем корпусе имитатора подается в кольцевой ресивер и оттуда на сопловой аппарат высокооборотной (до 60000 об/мин) осевой микротурбины, которая жестко связана с высоконапорным вентилятором. Осевые микротурбины имеют высокую удельную мощность, обладают плавностью хода и стабильностью характеристик, что позволяет устойчиво моделировать различные режимы работы силовой установки. Вентилятор рассчитывают из условия обеспечения требуемого расхода через воздухозаборник и получения равномерного поля скоростей на выходе. Наружный (вентиляторный) и внутренний (турбинный) контуры имитатора выполняют раздельными.

Так как скорость истечения и температура струи на выходе из турбины имитатора значительно ниже, чем у натурального двигателя, то моделирование выходного импульса турбинного контура достигается путем повышенного расхода воздуха через турбину. Таким образом, кинематическое подобие струи турбины и степень двухконтурности двигателя не моделируются.

При моделировании расхода через воздухозаборник расход через сопло вентиляторного контура и, следовательно, суммарный выходной импульс будут несколько выше, чем необходимо для обеспечения подобия. Причем, чем выше степень двухконтурности моделируемого двигателя, тем выше общая степень моделирования имитатором двигателя течения на входе и выходе одновременно.

Ротор имитатора имеет две опоры. Передняя опора – фиксирующая и воспринимает помимо радиальных осевые нагрузки от турбины и вентилятора. Задняя опора – плавающая. Для уменьшения осевого усилия, действующего на опоры ротора, корпус сопла турбинного контура оснащен разгрузочной полостью, в которую подается сжатый воздух. Кроме того, для предотвращения заклинивания ротора и повышения ресурса имитатора в разгрузочной полости устанавливают ограничитель колебаний ротора, возникающих при преодолении критических частот вращения.

Для обеспечения работы имитатора и контроля его параметров в процессе испытаний в корпусе имитатора устанавливают датчики температур подшипников и бесконтактный датчик оборотов ротора.

В целях повышения ресурса в имитаторах двигателей используют скоростные металлокерамические подшипники SKF закрытого типа. Применение этих подшипников, заполненных скоростной смазкой, помимо значительного увеличения ресурса позволило отказаться от системы принудительной смазки подшипников, что значительно упростило конструкцию имитатора и внутримодельного оборудования. Защита подшипников от выдувания консистентной смазки осуществляется комбинированными гидродинамическими уплотнениями и системой перепуска воздуха.

Одним из решающих факторов, значительно увеличивающих срок службы подшипников и имитатора в целом, является проведение высокоточной двухплоскостной динамической балансировки ротора в собственных опорах (в сборе с корпусом) на рабочей частоте вращения.

Имитаторы турбовинтовых двигателей выполняют по подобной схеме с передачей крутящего момента от турбины на воздушный винт, геометрически подобный натурному (рис. 3). Втулка винта обеспечивает возможность изменения угла установки лопасти.

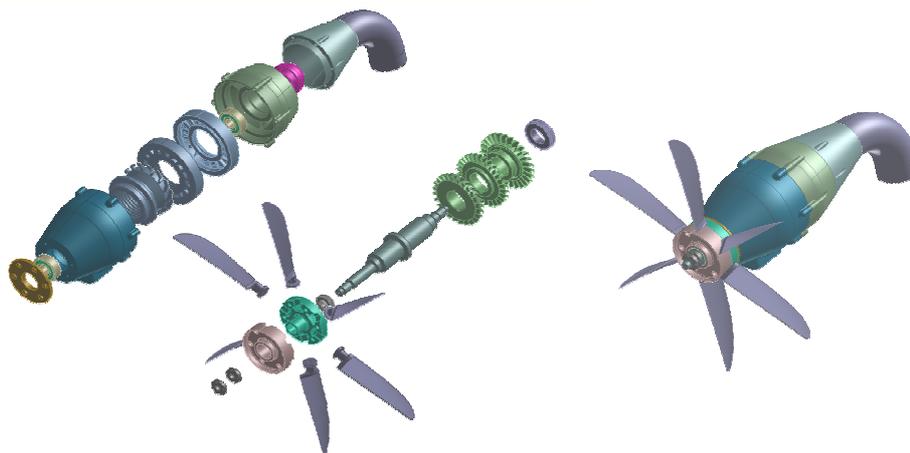


Рис. 3. Имитатор турбовинтового двигателя

Одной из основных особенностей роторных имитаторов турбовинтовых двигателей является то, что необходимая частота вращения ротора воздушного винта имитатора ниже оптимальной частоты вращения соответствующей высоким значениям КПД микротурбины, что приводит к значительному увеличению выходного импульса струи и уменьшению общей степени моделирования имитатором натурной силовой установки. Для получения приемлемых значений КПД системы «турбина – воздушный винт» принимают специальные конструктивные меры.

В имитаторе двигателя самолета Ан-140 для повышения КПД применяют многоступенчатую турбину, позволяющую понизить частоту вращения ротора, и понижающий редуктор для передачи крутящего момента от турбины на вал воздушного винта.

Имитатор винтовентиляторного двигателя Д-27 самолета Ан-70, воспроизводящий работу соосных винтов, выполнен по двухвальной схеме с двухкаскадным турбинным приводом встречного вращения и имеет систему регулирования частоты вращения каждого ротора. Применяют также вариант имитатора, имеющего один турбинный привод и редуктор для передачи крутящего момента на соосные винты, что позволило снизить расход воздуха через турбину и, следовательно, выходной импульс струи.

Таким образом, при использовании роторных имитаторов турбовинтовых или винтовентиляторных двигателей возможно воспроизведение практически всех основных рабочих параметров силовой установки (коэффициент тяги винта, поля скоростей и скосов за винтом и др.).

Моделирование силовой установки с помощью имитаторов двигателей с воздушной турбиной дает возможность точно воспроизводить различные режимы работы натурального двигателя и проводить широкий комплекс исследований моделей самолетов по определению основных аэродинамических характеристик с учетом и без учета тяги двигателей, а также оценивать взаимодействие двигателя с внешним потоком в присутствии модели самолета.

Роторные имитаторы двигателей позволяют проводить исследования различных вариантов реверсивных устройств как на изолированном имитаторе, так и на модели самолета в присутствии экрана, моделирующего поверхность земли. Эффективность реверсивного устройства в таком случае определяют по

результатам весовых испытаний модели с имитаторами или изолированного имитатора, работающих на режиме прямой тяги и реверсирования, и характеризуется коэффициентом реверсирования потока, а также областью ожидаемой рециркуляции реверсируемого потока.

Использование винтовентиляторных имитаторов позволяет проводить исследования по снижению уровня шума двигателя с различными углами установки и числом лопастей и различными скоростями вращения втулок винта. Имитатор турбореактивного двигателя позволяет проводить акустические исследования с различными вариантами геометрии сопла вентиляторного и турбинного контуров (шеvronные сопла).

Для роторных имитаторов двигателей разработаны методики расчета рабочих параметров при условии обеспечения одного – основного, точно моделируемого параметра, оказывающего определяющее влияние на аэродинамические характеристики самолета в конкретных условиях данного эксперимента. Например, в случае моделирования турбовентиляторного двигателя в качестве основного параметра принимают коэффициент тяги, учитывающий как течение на срезе сопла, так и течение на входе в воздухозаборник двигателя. При необходимости более точного моделирования течения в районе воздухозаборника в качестве основного параметра моделирования принимают коэффициент расхода через воздухозаборник. В случае моделирования винто-вентиляторного или турбовинтового двигателя в качестве основного параметра моделирования принимают коэффициент нагрузки на ометаемую винтом площадь, как основной параметр, определяющий режим работы винтовентиляторной установки.

В процессе проведения расчетов определяют требуемую мощность турбинного привода, параметры сжатого воздуха, подаваемого на турбину, частота вращения ротора ИМД и величины требуемых расходов через вентиляторный и турбинный контуры.

Расчет и профилировку лопастей вентилятора и турбины проводят по существующим для лопаточных машин методикам. Воздушный винт для имитатора винтовентиляторного двигателя выполняют геометрически подобным натурному воздушному винту.

Для предварительной оценки степени моделирования рабочих параметров натурной силовой установки и определения требуемых режимов работы ИМДВТ разработаны методики расчета дроссельных и скоростных характеристик имитаторов.

Для сокращения процесса создания и получения оптимальных характеристик ИМДВТ разработан комплекс программ по расчету газодинамических характеристик и определению прочности элементов ИМД с использованием системы MathCAD.

На ГП «Антонов» разработан и успешно эксплуатируется целый ряд роторных имитаторов двигателей различных схем. Создан также комплекс экспериментального оборудования, включающий в себя станцию высокого давления, систему управления имитаторами и тарировочные стенды для исследования дроссельных и скоростных характеристик имитаторов, полей скоростей и давлений на входе и выходе имитаторов двигателей. Кроме того, на

этих стендах также проводится обкатка и балансировка роторов в собственных опорах.

Разработаны методики и программное обеспечение для выполнения газодинамических и прочностных расчетов элементов конструкции имитаторов двигателей, а также для обработки результатов эксперимента.

Накоплен значительный опыт проектирования, изготовления, доводки характеристик имитаторов и испытаний их на моделях самолетов.

В настоящее время с развитием компьютерных информационных технологий все этапы проектирования имитаторов двигателей и внутримodelьных систем выполняются с применением систем автоматизированного проектирования. Программы газодинамических и прочностных расчетов проведены в системе MathCAD Professional, что позволило значительно сократить сроки и повысить точность выполнения расчетов. Трехмерное проектирование и оформление рабочей документации осуществляется в системе CADD5, что дает возможность более полно проработать конструктивные и технологические решения (рис. 4).

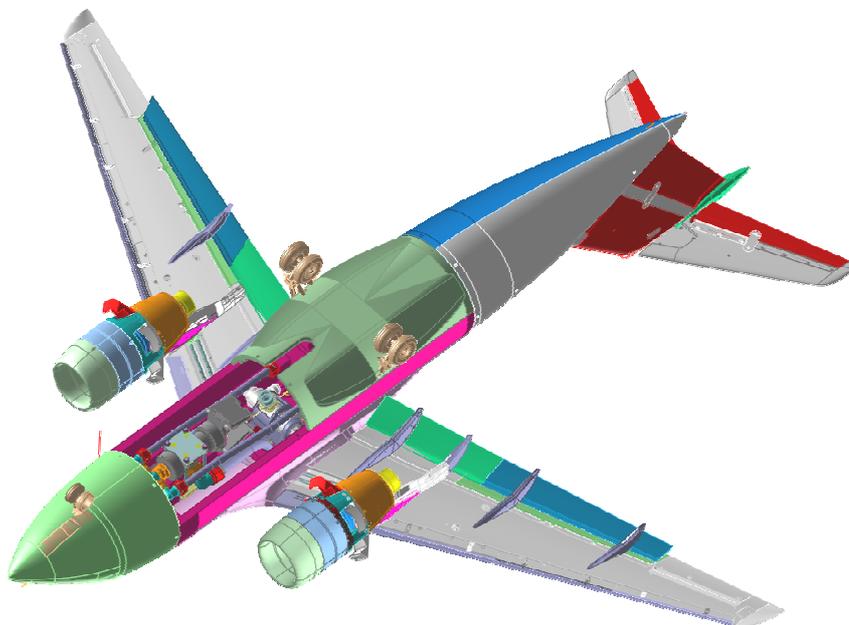


Рис. 4. Механизированная модель самолета Ан-148 с внутримodelьным оборудованием и присоединенными имитаторами двигателей, спроектированная в CADD5

3. Особенности конструкции аэродинамических моделей с моделированием работы силовой установки

В зависимости от целей и задач аэродинамических исследований с моделированием работы силовых установок на ГП «Антонов» применяют два основных типа аэродинамических моделей с имитаторами двигателей.

При моделировании обдувки струями двухконтурных турбореактивных или винто-вентиляторных двигателей элементов планера в условиях аэродинамической трубы АТ-1 ГП «Антонов». Антонова для упрощения методики эксперимента применяют схему модели с приставными имитаторами, т. е.

исследуют характеристики модели самолета в присутствии двигателей, а сами имитаторы не включены в силовую схему модели.

В этом случае модель устанавливают на подвеске аэродинамических весов, а имитаторы – вблизи модели на специальных стойках с системой подвода и регулирования воздуха, которые закреплены на специальном устройстве, позволяющем отслеживать изменение угла атаки модели (рис. 5). Агрегаты системы контроля и управления имитаторами располагают вне потока аэродинамической трубы, реактивную струю от турбины также отводят за пределы потока с помощью выхлопных труб.

Для проведения испытаний моделей с учетом силы тяги двигателей используют модели с присоединенными имитаторами, непосредственно закрепленными на модели (рис. 6). Такие модели имеют пустотелый фюзеляж, в котором располагают агрегаты внутримодельной системы управления и контроля работы имитаторов.

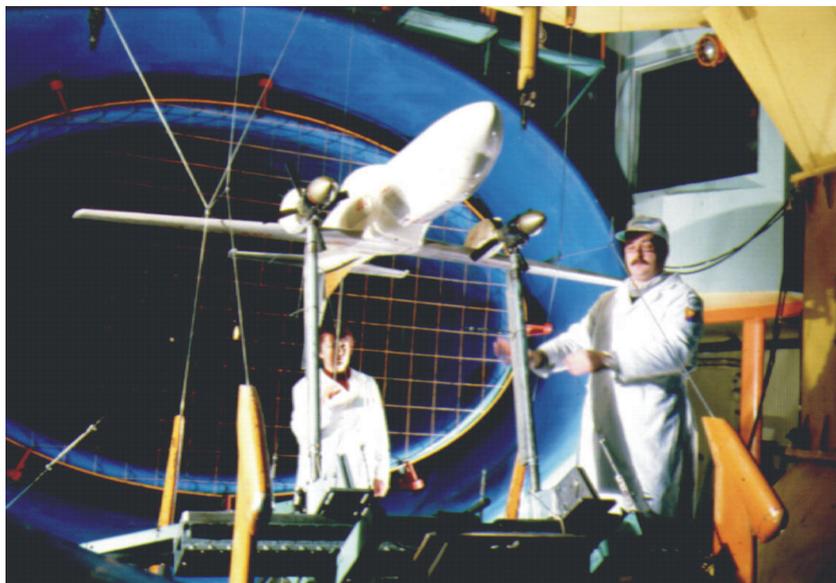


Рис. 5. Испытания модели самолета Ан-140 с приставными имитаторами двигателей в аэродинамической трубе АТ-1



Рис. 6. Испытания механизированной модели самолета Ан-148 с присоединенными имитаторами двигателей Д436-148 в аэродинамической трубе АТ-1

Внутримодельное оборудование включает в себя воздушный шарнир, обеспечивающий минимальное влияние внешней пневмосистемы на показания аэродинамических весов, трубопроводы высокого давления, малогабаритный дроссельный клапан для управления подачей сжатого воздуха, трубопроводы низкого давления для подвода воздуха к имитаторам, разъемы и кабели органов управления и контроля и, при необходимости, агрегаты и трубопроводы системы смазки имитаторов.

Для обеспечения работы имитаторов двигателей на требуемых режимах необходимым количеством воздуха, разработана специальная пневмосистема, в которую входит:

- два высоконапорных компрессора, после которых воздух проходит через маслоотделитель и осушительную систему;

- ресиверы высокого давления на 200 атм для аккумулирования запаса сжатого воздуха, позволяющие при работе обоих компрессоров, практически непрерывно проводить испытания аэродинамических моделей самолетов с роторными имитаторами двигателей;

- станцию высокого давления (СВД), служащую для подготовки и регулирования давления сжатого воздуха и подачи его к модели с имитаторами двигателей, включающую в себя:

- электрический подогреватель сжатого воздуха высокого давления, подаваемого к модели, для предотвращения обледенения имитаторов двигателей при срабатывании на турбинах большого перепада давлений;

- трехходовой клапан СВД для мгновенного переключения подачи сжатого воздуха из рабочей магистрали в магистраль стравливания и наоборот, а также аварийного клапана для мгновенного прекращения подачи сжатого воздуха к имитаторам или сброса избыточного давления в магистраль;

- систему частичного стравливания сжатого воздуха, служащую для обеспечения гарантированного расхода воздуха через электропечь и предотвращения ее перегрева, которая состоит из стравливающего клапана и выхлопного устройства, задросселированного на допустимый расход воздуха в атмосферу и служащего шумопоглотителем;

- магистраль подвода сжатого воздуха в рабочую часть аэродинамической трубы с гибкими переходными участками перед рамой аэродинамических весов;

- систему разводки сжатого воздуха по раме аэродинамических весов с воздушными шарнирами, исключаящими передачу нагрузок от трубопроводов на модель;

- пульт управления работой имитаторов и станцией СВД в кабине управления АТ-1.

Роторные имитаторы маршевых двигателей были применены при проведении на ГП «Антонов» испытаний аэродинамических моделей самолетов Ан-74, Ан-70, Ан-140, Ан-148, Ан-124. В ходе этих испытаний проводили исследования:

- влияния работающих имитаторов маршевых двигателей на аэродинамические характеристики модели самолета;

- особенностей обтекания и взаимодействия реактивных и винтовых струй с агрегатами планера модели – крылом, оперением, фюзеляжем, поверхностями управления;
- режимов реверсивной тяги двигателей на этапах разбега, на взлете и пробега при посадке в присутствии экрана, моделирующего поверхность взлетно-посадочной полосы;
- уровней шума винтами двигателей, в т.ч. при различных расстояниях между передним и задним винтом двигателя с соосными винтами;
- возможности возникновения вибраций планера самолета при взаимодействии с реактивными и винтовыми струями двигателей.

Результаты этих исследований позволяют, прежде всего на этапах проектирования, находить решения, обеспечивающие более высокий уровень аэродинамического и в целом технического совершенства самолета.

В заключение следует отметить, что проведение испытаний аэродинамических моделей самолетов с имитаторами маршевых двигателей является неотъемлемой частью процесса создания нового самолета ГП «Антонов», его летных испытаний, сертификации, а также сопровождения его серийной эксплуатации.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., В.В. Тюрев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 01.03.10

Розроблення та застосування роторних імітаторів двигунів для моделювання силових установок при проведенні аеродинамічного експерименту

Розглянуті основні методи моделювання силових установок аеродинамічних моделей, принцип роботи та особливості конструкції аеродинамічних моделей з моделюванням роботи силової установки.

Ключові слова: силова установка, аеродинамічна модель, метод моделювання, імітатор двигуна, експеримент.

Development and use of rotor simulator of an engine for modeling of power units during carrying out of aerodynamic experiment

The principal methods of modeling of power units for aerodynamic models, the principle of operation of peculiarities of construction of aerodynamic models with modeling of power unit operation are considered.

Keywords: power unit, aerodynamic model, modeling method, engine simulator, experiment.