

УДК 621.671.0015532.5.539.4

С.М. АРИНКИН, Н.М. ГОРБАЧЕВ

Институт тепло- и массообмена Национальной академии наук Беларуси

САМОУСТАНОВЛИВАЮЩИЕСЯ СТЕНДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ И СИСТЕМ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Представляется описание и обоснование конструкций самоустанавливающихся (самобалансирующихся) стендов для испытаний изделий и их систем авиационной и ракетно-космической техники (РКТ). Стенды позволяют проводить испытания изделий на прочность и функциональность под воздействием центробежных нагрузок и вибрации раздельно и совместно.

самоустанавливающееся опорное устройство, наименьшее сопротивление, уводящие моменты и силы, гидромонитор, имитация реактивной тяги, перегрузка

Введение

Обеспечение безопасности полетов летательной техники в условиях все увеличивающихся скоростей и высот, нагрузок и перегрузок требует проведения предварительных всесторонних испытаний конструкций и систем управления в условиях, максимально приближенных к реальным в процессе эксплуатации изделий.

1. Формулирование проблемы

Создать конструкции испытательной техники, обеспечивающие наибольшее соответствие условиям реальной эксплуатации.

1.1. Общие соотношения

Обеспечить максимально возможное соответствие уровня воздействия нагрузок, воспроизводимых на стенде, их значениям в полете – перегрузок, скоростей, температур нагрева конструкций, возможным величинам нагрузок.

2. Решение проблемы

Безопасное повторное создание перегрузок, скоростей движения и уровня вибрации объекта испытаний обеспечиваются созданием испытательного оборудования, где частота вращения и радиус установки объекта испытаний контролируется средствами линейных и угловых измерений. Частота враще-

ния – по числу оборотов объекта испытаний или двигателя привода, величина перегрузки – расчетом или датчиком измерителем ускорений на объекте испытаний.

3. Конструкция и принцип работы испытательных стендов

3.1. Стенд испытаний активных действующих объектов (работающих реактивных и авиационных двигателей) переменной массы на воздействие линейных и вибрационных перегрузок

На рис. 1 представлена принципиальная конструкция этого стенда [1].

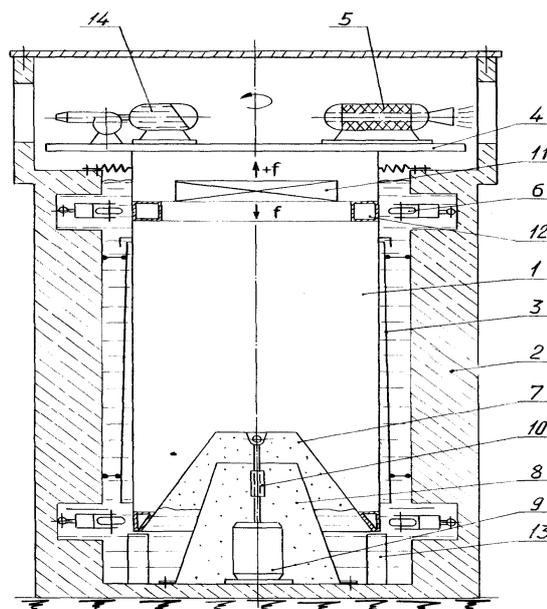


Рис. 1. Схема испытательного стенда активных объектов авиационной и РКТ переменной массы

Стенд состоит из самоустанавливающего опорного цилиндра 1, погруженного в бассейн с жидкостью 2, демпферной цилиндрической стенки 3, установленной эквидистантно цилиндру, платформы 4 для установки испытуемого объекта 5 на верхней торцевой поверхности опорного цилиндра, двух разнесенных по высоте поясов демпферных устройств 6 в виде управляемых равномерно установленных по окружности демпферных устройств – гидравлических (пневматических) силовых цилиндров с упругими колесами, контактирующими с наружными поверхностями шпангоутов опорного цилиндра, системы управления. Опорный цилиндр имеет утопленное внутрь коническое днище 7. Соосно ему на дне бассейна установлен герметичный конический цилиндр 8 с открытым верхним торцом. Внутри конического цилиндра устанавливается привод 9 стенда. Величина углубления конического днища опорного цилиндра и высота входящего в него конического цилиндра выбираются из условия, что при заполнении бассейна жидкостью образующийся между ними воздушный колокол предотвращает попадание жидкости на двигатель привода. Вал 10 привода выполнен составным изменяющимся по длине (шлицевое соединение), обеспечивающим передачу крутящего момента привода и осевое перемещение от вибратора.

Виброустройство (вибратор) 11 установлено внутри опорного поплавка на поверхности верхнего шпангоута 12.

Перед испытаниями поплавок опирается на подставку 13, размещенную на дне бассейна. Для уравновешивания объекта испытаний на грузовой платформе установлен гидромонитор 14. Гидромонитор уравнивает вес объекта в исходном состоянии и в процессе испытаний, а так же реактивную тягу двигателя. Виброустройство обеспечивает заданный уровень вибрационной нагрузки объекта испытаний. Грузоподъемность рассматриваемого стенда определяет объем вытесненной по-

плавком жидкости. Восприятие разности тяг и дисбаланса масс работающих гидромонитора и объекта испытаний регулируется управляемыми силовыми возбудителями и способностью опоры к самобалансировке.

3.2. Стенд испытаний систем управления объектов ракетно-космической техники

Назначение стенда – обеспечить пространственное движение объектов с 5-ю степенями свободы, наименьшими величинами сопротивления и уведящих моментов от возникающих гидродинамических сил вследствие неровностей и шероховатостей опорной поверхности. Известен стенд такого назначения, представляющий сферическую оболочку диаметром пять метров, поддерживаемую на весу потоком воздуха над полусферической чашей основания стенда. Поток воздуха движется в зазоре между ними со скоростью до 15 м/с и создает переменное по потоку избыточное давление величиной $(0,02 - 0,04) \text{ кг/см}^2$.

На рис. 2 представлена принципиальная конструкция самобалансирующего стенда [2].

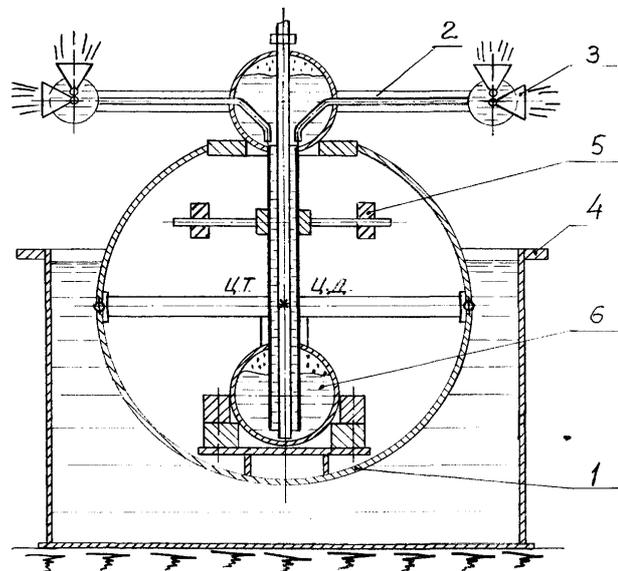


Рис. 2. Схема стенда испытаний систем управления и ориентации авиационной и РКТ

Представляемая на рис. 2 конструкция стенда включает сферическую оболочку 1 с грузовой

платформой 2, на которой устанавливается испытуемая система 3. Сферическая оболочка погружена в бассейн 4, заполненный жидкостью. На грузовой платформе 2 и внутри сферы 1 монтируются механические 5 и гидравлические 6 системы уравновешивания. Эти системы обеспечивают совмещение в центре сферы центров тяжести и давления на подвижную систему в целом. Грузоподъемность рассматриваемого стенда обеспечивается объемом и плотностью жидкости, вытесняемой сферой при ее погружении в бассейн.

При равных с газодинамическим стендом габаритах опорных сфер величины сопротивления движению и степень влияния возмущающих факторов (шероховатость, выемки поверхности, локальные несовершенства формы) в каждом из стендов будут определяться гидромеханикой процесса их вывешивания. Вес испытуемой системы управления принимается равным 5 тонн. Угловая скорость движения опоры не превышает 0,2 м/с.

Отличием рассматриваемых способов вывешивания является гидромеханика процессов. В газодинамическом способе вывешивания имеет место обтекание сферы и грузовой платформы с испытуемой системой потоком воздуха в ограниченном зазоре между подвижной опорой и основанием.

В гидростатической опоре происходит медленное (ползущее) перемещение вывешенной системы в неограниченном объеме жидкости.

Согласно [3] сопротивление отдельных элементов шероховатости поверхности тела в зависимости от типа обтекания и площади поперечного сечения выступающих элементов (площадь наибольшего поперечного сечения) различной формы и высоты может изменяться в (1,5 – 3) раза. В значительной мере это зависит от толщины пограничного слоя обтекающей среды, а механика течения отличается в зависимости от среды и типа обтекания – течение жидкости или газа в ограниченном или неограниченном объеме.

Принимая единое значение допустимой величины относительной шероховатости, можно провести оценку ее влияния в рассматриваемых типах стендов в зависимости от числа Рейнольдса.

Критическая величина шероховатости при ламинарном течении (ползущее обтекание) значительно выше, чем при турбулентном ($Re > 3 \times 10^5$). Следовательно, в стенде на сферической гидроопоре влияние неровностей обработки поверхности существенно меньше, чем в стенде обдуваемом потоком воздуха. Тем более, что скорости движения сфер и среды обтекания отличаются в сотни раз. Учитывая, что плотность потока воздуха зависит от степени его сжатия, можно ожидать еще большего различия степени влияния одинаковых возмущений на величину возникающих сил и уводящих моментов для рассмотренных типов опор.

3.3. Стенд испытаний изделий на действие центробежных нагрузок

Стенд может быть использован для испытаний изделий массой от единиц до десятков тонн со значительным дисбалансом, возникающим в процессе испытаний.

На рис. 3 представлена принципиальная схема стенда [4].

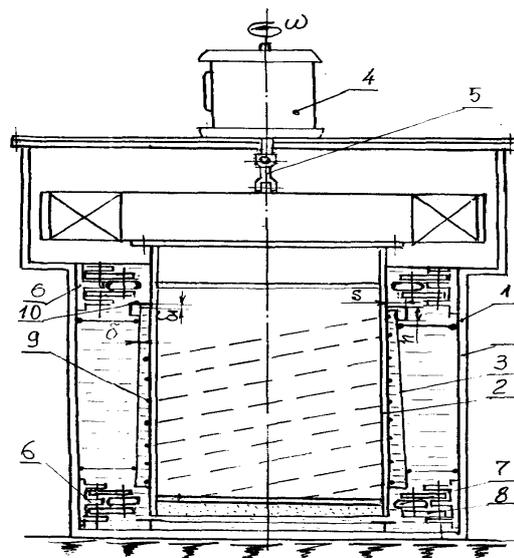


Рис. 3. Схема стенда испытаний объектов авиационной и РКТ и их систем на действие инерционных сил

Стенд состоит из корпуса 1 (бассейна), заполняемого жидкостью, размещенный внутри него цилиндрический опорный поплавок 2, служащий для установки на торце платформы крепления объектов испытаний, демпфирующее устройство 3 в виде слабokonической цилиндрической обечайки, установленной с зазором коаксиально опорному поплавку, связанной со стенкой и дном корпуса, электрический двигатель 4 с гибким приводным валом 5 и двух демпфирующих поясов 6.

Каждый демпферный пояс включает равномерно размещенные по окружности колеса 7 с упругими шинами, связанные между собой при помощи шарнирно закрепленных на стенке корпуса коромысел 8. Кинематическая связь колес между собой выполнена так, что обеспечивается одновременное радиальное перемещение их в зазоре между обечайкой и опорным поплавком. Приводной вал 5 состоит по длине из звеньев, связанных горизонтальными осями, расположенными по окружности под равными углами.

На наружной поверхности опорного поплавка смонтирована спираль 9, обеспечивающая осевое перемещение потока жидкости внутри зазора при вращении ротора, а так же кольцевой диск 10 с отбортовкой, обращенной к дну корпуса, образующий с торцом слабokonической обечайки дроссель 7 жидкости в зазоре. Спираль и дроссель создают в зазоре радиальноосевой поток жидкости, обеспечивающий демпфирование вращающейся системы. Повышение демпфирования обеспечивается соответствующим выбором размеров дросселирующего канала

$$S > 2\delta + \delta_{ст}; h > (1,5 - 2)\delta_1; \delta_1 < (0,5 - 1)\delta,$$

где S – ширина диска отбортовки;

δ – величина зазора между стенками;

$\delta_{ст}$ – толщина стенки;

δ_1 – величины зазора между диском отбортовки и торцом демпферной стенки.

Многозвенность и шарнирное соединение звеньев приводного вала обеспечивают подвижность привода в горизонтальной плоскости.

Площадь проходного сечения между торцом слабokonической обечайки и кольцевого диска выполняется меньшим, чем в зазоре между поплавком и демпферной стенкой. Это обеспечивает повышение давления в зазоре между ними и эффективность демпфирования роторной системы. Кинематика связи элементов демпферных поясов создает одновременный многоточечный контакт опорного поплавка с колесами. Получается упругое ограничение радиального перемещения роторной системы в зазоре, предотвращающее контакт с демпферной стенкой. За счет объемов опорного поплавка и корпуса его погружения обеспечивается возможность создания испытательных стендов неограниченной грузоподъемности и требуемой интенсивности центробежного поля. Сравнительные расчетно-теоретические исследования [5] показали, что по энергетике эффективность таких стендов по сравнению с известными увеличивается с увеличением их грузоподъемности.

3.4. Центробежный стенд двухсторонней пропитки труднопроницаемых образцов материалов

На рис. 4 представлена принципиальная схема стенда [6].

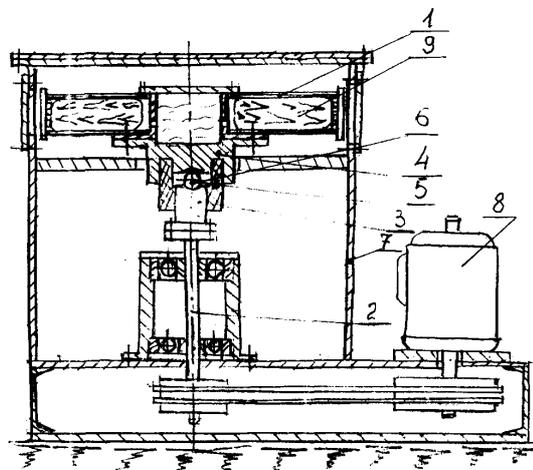


Рис. 4. Схема стенда испытаний объектов авиационной и РКТ на воздействие интенсивных инерционных сил

Стенд включает самобалансирующийся центробежный привод, дисковую камеру 1 с радиальным размещением образцов, соединенную с центральной камерой для заливки пропитывающей жидкости, связанной радиальными каналами с камерами пропитки.

Центробежный привод представляет вертикальный вал 2 в подшипниках качения и узел крепления 3 к дисковой камере 1. Узел крепления включает фланцевую цилиндрическую опорную втулку 4 с внутренней упругой манжетой 5, в которую входит вал привода, на конце которого в сферической выемке установлен шарик 6. Привод и плита размещены по оси цилиндрического корпуса 7 с торцевой крышкой. Манжета с шарниром и валом образуют упругую сходящую пару, обеспечивающую радиальное и угловое смещение диска с образцами. Вал через опорный узел с подшипниками качения выходит из корпуса и посредством клиноременной передачи связан с валом электрического двигателя 8 привода. После укладки образцов 9 в радиальные камеры, их герметизации, заливки в центральную камеру пропитывающего состава до полного заполнения камер пропитки, включают питание привода и доводят роторную систему до установленной частоты вращения.

Дисбалансы пропитываемых образцов в исходном состоянии и в процессе пропитки компенсируются упругой связью заполненного диска с валом привода, позволяющей диску устанавливаться в нейтральное положение – соответствующее самобалансировке вращающейся системы. Прочный корпус обеспечивает полную локализацию аварийных пусков. Стенд позволяет раскручивать роторную систему до частот, при которых в пропитывающих камерах возникает давление от десятков до сотен атмосфер и реализуется всесторонняя центробежная пропитка образцов материала. На нем же возможно центробежное обезвоживание (сушка), а также испытания изделий на действие

центробежных перегрузок интенсивностью сотен и тысяч единиц.

3.5. Вибростенд для проведения динамических испытаний тяжелых крупногабаритных изделий авиационной и РКТ

Стенд создан на основе самоустанавливающейся гидростатической поплавковой опоры вывешивания и балансировки испытуемой системы.

Упругие опоры поплавкового типа характеризуются низкой динамической жесткостью в широком диапазоне частот. Это позволяет создать эффективную дополнительную подвеску рабочих столов, вибровозбудителей при испытаниях тяжелых, динамически сложных изделий, таких, например, как двигатели летательных аппаратов. Собственно подвеска современных электродинамических и электрогидравлических вибровозбудителей имеет ограниченную несущую способность до 10000 Н.

На рис. 5 приведена конструктивная схема испытательного стенда.

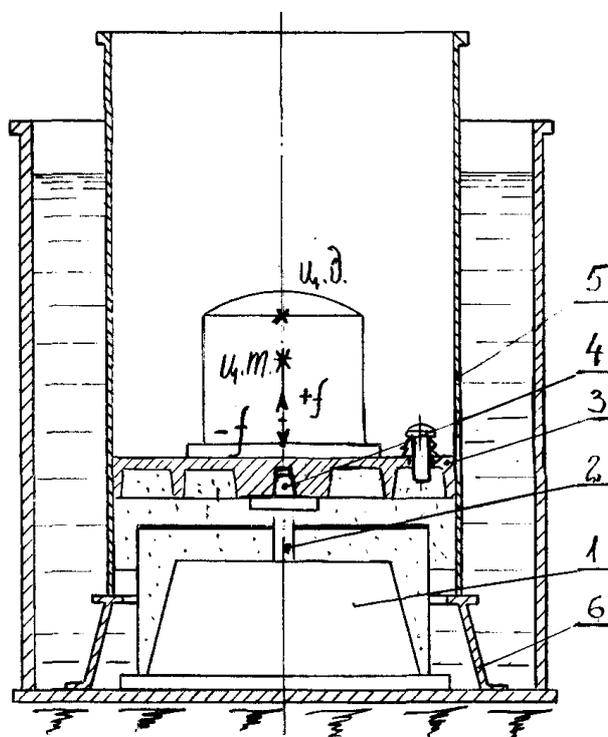


Рис. 5. Схема стенда вибрационных испытаний объектов авиационной и РКТ

Проведение динамических испытаний изделий «в сборе» требует комплексного проектирования системы их вывешивания, включающей корпус вибровозбудителя 1, подвеску 2, стол 3, переходное устройство 4, дополнительную подвеску 5, основание 6.

Подвеска представляет собой так называемую систему вывешивания. В качестве ее в большинстве случаев используются резиновые жгуты, механические пружины и РКО (пневмоэлементы). Волновые явления в этих элементах снижают точность воспроизведения заданных режимов в среднем диапазоне частот. Для снижения паразитных поперечных вибраций требуется введение дополнительных направляющих и балансировочных устройств. В значительной мере этих недостатков лишена поплавковая опора, имеющая низкую жесткость и значительное поперечное демпфирование.

Конструкция системы состоит из переходного устройства типа «воздушный колокол», испытуемого изделия на плаву в специальном цилиндрическом корпусе или в бассейне. В нижней, воздушной части колокола, переходное устройство соединено со столом вибровозбудителя. Роль упругого элемента выполняет воздушная подушка поплавка, боковая поверхность которого служит демпфером поперечных колебаний. На «плаву» перед соединением с вибровозбудителем производится статическая балансировка изделия с переходником и системой испытаний. В зависимости от вида конструкции вывешивающего устройства – поплавка, полые цилиндр или прямоугольная герметичная емкость можно создать не только стенд виброиспытаний, но и технологическую систему формования различных изделий из бетона и других материалов.

Заключение

Представлено описание принципов создания и типовые конструкции стендов (систем) наземных испытаний изделий авиационной и ракетно-космической техники, позволяющих проводить наземную отработку изделий в условиях, максимально приближенных к действию нагрузок в реальных условиях полета.

Литература

1. Стенд для испытаний активных объектов переменной массы. Авторское свидетельство № 1708055.
2. Стенд испытаний систем управления РКТ. Патент № 2031384.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 320 с.
4. Стенд испытаний изделий на действие центробежных нагрузок к вибрации. Патенты: № 1777963, № 1839640, № 2049565, № 2089297.
5. Марцинковский В.А. Гидродинамика и прочность центробежных насосов. – М.: Машиностроение, 1970. – 284 с.
6. Центробежный стенд всесторонней пропитки труднопроницаемых образцов материалов. Патент № 2052300.
7. Стенд вибродинамических испытаний изделий РКТ и авиационной техники. Патент № 1690461.

Поступила в редакцию 17.05.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, ИПМаш НАН Украины, Харьков.