

ИНЖЕНЕРНЫЙ ЖУРНАЛ СПРАВОЧНИК

2 (335) 2025

С приложением

Научно-технический и производственный журнал
Издается с января 1997 года

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии

Гадалов В. Н., Кутепов С. Н., Петренко В. Р., Жилина К. В., Калинин А. А.
Мониторинг режимов термического упрочнения на изменение физико-механических свойств арматурных сталей 3

Конструирование, расчеты

Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Гойдо М. Е., Ларин О. В., Староверов Ю. А.
Гидравлический стенд для вибрационных испытаний космических аппаратов 15

Нижегородов А. И. Фазовое и объемное регулирование аксиально-поршневыми гидромашинами с двухрядными рабочими камерами качающих узлов. Обзор новых разработок 23

Безъязычный В. Ф., Савченков М. И. К вопросу учета значений разброса физико-механических свойств материалов деталей при обработке резанием 34

Волосатов А. А., Рябинин М. В. Коррекция динамических характеристик регулятора давления АППН с помощью алгебраических критериев устойчивости 42

Металлорежущие станки и инструменты

Альбов М. А., Акулиничев П. Д., Гончаров А. А. Проектирование профильного инструмента для реализации метода героторного сверления мелкоразмерных внутренних циклоидальных винтовых поверхностей 50

Сегодня – студент, завтра – инженер

Хотина Г. К., Шабунина В. А., Полунин Н. А. Моделирование резьбовых соединений в системе SolidWorks 56

Разная информация

Глазунов Д. В. Автоматизация процесса лубрикации системы «колесо–рельс» вагонами-рельсосмазывателями 64

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ультразвуковые размерные технологии

Киселев Е. С. Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок 71

**Председатель
редакционного совета**
академик РАН, д-р техн. наук
Р. Ф. ГАНИЕВ

**Заместитель председателя
редакционного совета**
д-р техн. наук, проф.
А. В. КИРИЧЕК

Главный редактор
П. Е. КЛЕЙЗЕР

Заместитель главного редактора
А. А. КУЛИКОВА

Редакция:
С. М. МАКЕЕВА, А. А. КУЛИКОВА

Редакционный совет:

А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, д-р техн. наук, проф.	А. Ю. КОНЬКОВ, д-р техн. наук
В. Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д-р техн. наук, проф.	В. Г. МАЛИНИН, д-р физ.-мат. наук, проф.
А. И. БОЛДЫРЕВ, д-р техн. наук, проф.	С. А. МИКАЕВА, д-р техн. наук, доцент
Р. БЛАШКОВИЧ, д-р техн. наук, проф. (Словакия)	А. И. НИЖЕГОРДОВ, д-р техн. наук, проф.
А. Л. ВОРОНЦОВ, д-р техн. наук, проф.	Г. А. НУЖДИН, канд. техн. наук
В. А. ГЛАЗУНОВ, д-р техн. наук, проф.	Ю. В. ПАНФИЛОВ, д-р техн. наук, проф.
В. А. ГОЛЕНКОВ, д-р техн. наук, проф.	В. Я. РАСПОПОВ, д-р техн. наук, проф.
С. Н. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук, проф.	В. П. СМОЛЕНЦЕВ, д-р техн. наук, проф.
А. А. ЖУКОВ, канд. техн. наук, проф.	Ю. С. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук, проф.
В. Л. ЗАКОВОРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф.	С. Ю. ШАЧНЕВ, канд. техн. наук
Ю. М. ЗУБАРЕВ, д-р техн. наук, проф.	М. ЧЕККАРЕЛИ, PhD, проф. (Италия)
А. С. КАЛАШНИКОВ, д-р техн. наук, проф.	В. П. ЧИРКОВ, д-р техн. наук, проф.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 014670 от 25.12.1997 г., Свидетельство о перерегистрации ПИ № ФС 77-46364 от 26.08.2011 г.

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении, или непосредственно в издательстве. Индексы по каталогам:
41299 – «Пресса России»;
П3653 – электронный каталог "Почта России"

Телефоны редакции:
(495) 589 56 81, (495) 514 76 50
Адрес редакции: 119048, г. Москва,
ул. Усачева, д. 35, стр. 1
E-mail: hb@idspektr.ru; sizhpost@gmail.com
Http://www.handbook-j.ru; Http://www.idspektr.ru

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Справочник. Инженерный журнал», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

HANDBOOK

AN ENGINEERING JOURNAL

2 (335)

2025

With supplement

Scientific, technical and production monthly journal
Publishes from January, 1997

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

CONTENTS

Up-to-date Technologies

Gadalov V. N., Kutepov S. N., Petrenko V. R., Zhilina K. V., Kalinin A. A. Monitoring of Thermal Hardening Regimes Changes in Physical and Mechanical Properties of Reinforcing Steels 3

Constructing, Calculations

Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Goydo M. E., Larin O. V., Staroverov Yu. A. Hydraulic Stand for Vibration Testing Spacecrafts 15

Nizhegorodov A. I. Phase and Volume Control by Axial Piston Hydraulic Machines with Double-Row Working Chambers of Pumping Units: A Review of Recent Achievements 23

Bezjazychnyj V. F., Savchenkov M. I. On the Issue of Accounting the Values of the Values of Physical and Mechanical Properties of Parts Materials During Cutting Processing 34

Volosatov A. A., Ryabinin M. V. Correction of the Dynamic Characteristics of the Pressure Regulator of APGN Using Algebraic Stability Criteria 42

Metal-Cutting Machines and Tools

Albov M. A., Akulinichev P. D., Goncharov A. A. Design of Profiling Tool for Implementation of Gerotor Drilling Method of Small-Sized Internal Cycloidal Helical Surfaces 50

Today – a Student, Tomorrow – Engineer

Khotina G. K., Shabunina V. A., Polunin N. A. Modeling of Threaded Connection in the SolidWorks System 56

Different Information

Glazunov D. V. Automation of the Lubrication Process of the Wheel–Rail System by Railcars 64

SUPPLEMENT.

Ultrasonic Dimensional Technologies

Kiselev E. S. Modern Ultrasonic Dimensional Technologies for Mechanical Processing of Workpieces 71

President of Editorial advisory
R. F. GANIEV

Chairman Assistant
A. V. KIRICHEK

Editor-in-Chief
P. E. KLEYZER

Editorial council
A. A. KULIKOVA

Edition:
S. M. MAKEEVA, A. A. KULIKOVA

Editorial council:

A. YU. ALBAGACHIEV	A. Yu. KON'KOV
V. F. BEZYZYCHNY	V. G. MALININ
A. I. BOLDYREV	S. A. MIKAEVA
R. BLAZHKOVICH (Slovakia)	A. I. NIZHEGORODOV
A. L. VORONTSOV	G. A. NUZHIDIN
V. A. GLAZUNOV	Yu. V. PANFILOV
V. A. GOLENKOV	V. Ya. RASPOPOV
S. N. GRIGORIEV	V. P. SMOLENTSEV
A. A. ZHUKOV	Yu. S. STEPANOV
V. L. ZAKOVOROTNY	S. Yu. SHACHNEV
Yu. M. ZUBAREV	M. CECCARELLI (Italy)
A. S. KALASHNIKOV	V. P. CHIRKOV

The journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. Registration certificate N 014670 at 25.12.1997. Re-registration ПИ N ФС 77-46364 at 26.08.2011.

The journal is being distributed according to a subscription, which is available in any post office or at the publishing house directly. Indexes in the catalogue:

41299 – “Pressa Rossii” union catalogue;
П3653 – Electronic catalog “Pochta Rossii”

Tel.: (495) 589 56 81; (495) 514 76 50

Edition address: Buil. 1, Usacheva St. 35,
Moscow, Russia, 119048

E-mail: hb@idspektr.ru; sizhpost@gmail.com

Http://www.handbook-j.ru; www.idspektr.ru

The Journal is among those approved by VAC RF for dissertation publication.

Reprint, all types of copying and reproduction of the materials published in the journal "Handbook. An Engineering journal" are allowed only with the permission from the editors and with the reference to the source of information. Advertisers are fully responsible for the content of the

В. В. Бодров, канд. техн. наук, **Р. М. Багаутдинов**,
М. Е. Гойдо, канд. техн. наук, **О. В. Ларин**, **Ю. А. Староверов**
(ООО «Уральский инженеринговый центр», Челябинск, Россия;
e-mail: goido@cheltec.ru)

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Приведена информация о составе универсального трехосевого сервогидравлического вибростенда, предназначенного для проведения вибрационных испытаний (на режимах синусоидальных и широкополосных случайных вибрационных воздействий) космических аппаратов на этапах наземной экспериментальной отработки и приемо-сдаточных испытаний летных образцов на нагрузки, возникающие при транспортировке на космодром и в процессе запуска ракеты-носителя. Вибростенд разработан и изготовлен в ООО «Уральский инженеринговый центр» (г. Челябинск). Представлены результаты проверочных и проектировочных расчетов, касающихся энергетических характеристик силового гидропривода вибростенда и выбора пневмогидравлических аккумуляторов, обеспечивающих снижение колебаний давления в напорных и сливных каналах силовых сервогидравлических приводов, создающих вибрации универсальной платформы-переходника стенда с установленным на ней объектом испытаний в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Ключевые слова: сервогидравлический вибростенд; гидросистема; пневмосистема; проверочные и проектировочные расчеты.

V. V. Bodrov, R. M. Bagautdinov, M. E. Goydo, O. V. Larin, Y. A. Staroverov
(Ural engineering center, Chelyabinsk, Russia)

HYDRAULIC STAND FOR VIBRATION TESTING SPACECRAFTS

Information is provided on the composition of a universal three-axis servo-hydraulic vibration stand designed for vibration testing (in the modes of sinusoidal and broadband random vibration effects) of spacecrafts at the stages of ground experimental testing and acceptance tests of flight samples at the loads arising during transportation to the spaceport and during launch of the rocket carrier. The stand was designed and manufactured into LLC "Ural Engineering Center" (Chelyabinsk). The results of verification and projecting calculations are presented, that are touching to energy characteristics of the power hydraulic drive of the vibration stand and the selection of pneumatic-hydraulic accumulators that provide a reduction in pressure fluctuations in the pressure and drain channels of the power servo-hydraulic drives, that create vibrations of universal adapter platform of the stand with the test object installed on it in the vertical and horizontal directions.

Keywords: Servo-hydraulic vibration stand; Hydraulic system; Pneumatic system; Verification and projecting calculations.

Статья поступила в редакцию 31.07.2024 г.

Введение

В 2018 г. ООО «Уральский инженеринговый центр» было поручено спроектировать, изготовить и запустить в эксплуатацию универсальный трехосевой сервогидравлический вибростенд (УТСВ) для АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Стенд предназначен для проведения вибрационных испытаний (на режимах синусоидальных и

широкополосных случайных вибрационных воздействий) космических аппаратов (КА) на этапах наземной экспериментальной отработки и приемо-сдаточных испытаний летных образцов на нагрузки, возникающие при транспортировке на космодром и в процессе запуска ракеты-носителя.

По сравнению с существующими вибростендами подобного назначения [1 – 3] УТСВ отличается расширенными функциональными возможно-

стями, позволяя, в частности, проводить вибрационные испытания КА при различных способах их крепления. Масса объектов, которые могут испытываться на УТСВ, составляет до 5,5 т, а их высота – до 10 м.

Состав вибростенда и параметры вибраций

В состав вибростенда (рис. 1, 2) входят следующие основные части:

- сейсмическая масса (СМ);
- универсальная платформа-переходник (УПП) для крепления объекта, подлежащего вибрационным испытаниям;
- силовые сервогидравлические приводы (ССГП) для реализации поступательного движения УПП вместе с объектом вибрационных испытаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях (в вертикальном и двух горизонтальных) в соответствии с заданными законами;
- насосно-аккумуляторная установка (НАУ) для осуществления питания рабочей жидкостью высокого давления ССГП, включая гидростатические подшипники гидроцилиндров ССГП;
- комплект пневмоподушек для вывешивания СМ вместе с установленным на ней оборудованием и объектом вибрационных испытаний относительно фундамента монтажно-испытательного корпуса (МИК);
- комплект пневмоподушек для вывешивания УПП вместе с объектом вибрационных испытаний относительно СМ;
- пневматическая система регулирования и контроля давления в пневмоподушках, предназна-

ченных для осуществления вывешивания СМ вместе с установленным на ней оборудованием и объектом вибрационных испытаний относительно фундамента МИК;

– пневматическая система регулирования и контроля давления в пневмоподушках, предназначенных для осуществления вывешивания УПП с объектом вибрационных испытаний относительно СМ;

- силовые электрощкафы;
- шкафы автоматики и пульты управления;
- вспомогательное технологическое оборудование.

Сейсмическая масса представляет собой монолитный железобетонный блок с системой анкеров для крепления элементов стенда на верхней поверхности и площадками для установки пневмоподушек по периметру нижней части. Сейсмическая масса входит в систему виброизоляции, предназначенную для снижения вибрационного воздействия на строительные конструкции МИК при работе стенда. Масса, высота, длина и ширина СМ составляют соответственно: 700 т, 4500 мм, 10000 мм и 7000 мм. В соответствии с техническим заданием на выполнение работы (далее по тексту ТЗ) собственная частота колебаний СМ как твердого тела (без учета ее упругих деформаций) на упругой подвеске должна быть не более 2,5 Гц. Для обеспечения статической компенсации собственной силы тяжести СМ с установленным на ней оборудованием и объектом вибрационных испытаний при одновременном выполнении вышеуказанного требования используются тридцать однокамерных пневмоподушек типа 148-1 (№ W01-V58-6969) производ-

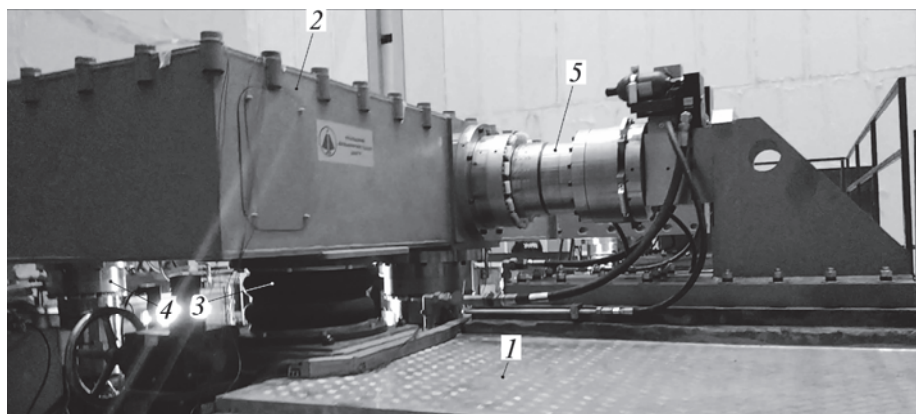


Рис. 1. Общий вид универсального трехосевого сервогидравлического вибростенда:

1 – сейсмическая масса (СМ); 2 – универсальная платформа-переходник (УПП); 3 – пневмоподушка вывешивания УПП относительно СМ; 4 – силовой сервогидравлический привод (ССГП) для создания вибраций в вертикальном направлении; 5 – ССГП для создания вибраций в горизонтальном направлении

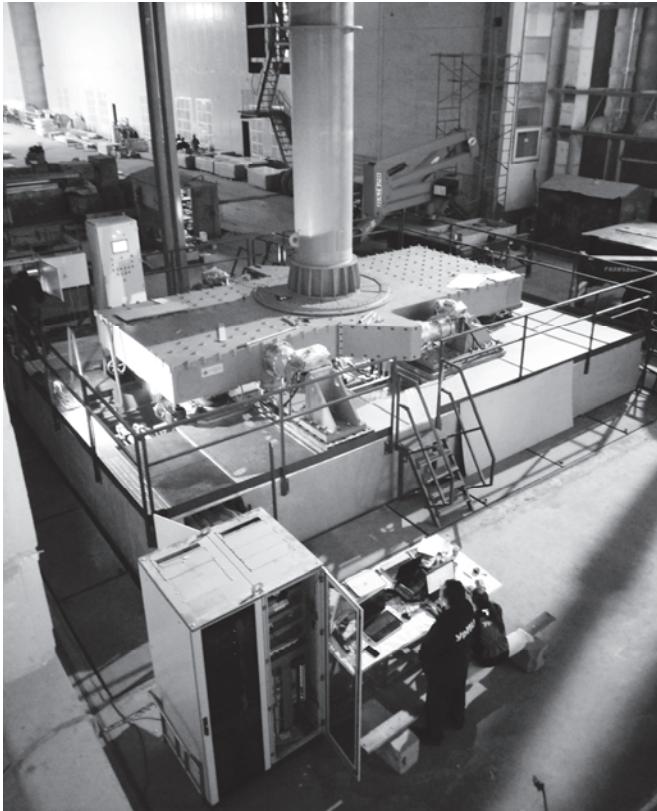


Рис. 2. Общий вид универсального трехосевого сервогидравлического вибростенда с макетом космического аппарата, установленным на универсальную платформу-переходник, в процессе пусконаладочных работ

ства фирмы “Firestone” (США), которые разделены на группы в целях получения статически определенной системы установки СМ в требуемое положение по высоте с нулевым углом наклона по отношению к горизонту.

Универсальная платформа-переходник предназначена для обеспечения передачи испытательного воздействия от ССГП УТСВ к объекту испытаний (КА или макету КА) в соответствии с заданным направлением вектора ускорений. В соответствии с ТЗ при массе, не превышающей 10 500 кг с учетом всех переходных элементов, УПП должна обеспечивать: передачу объекту испытаний испытательного воздействия без ее пластических деформаций и минимальную резонансную частоту с учетом полной массы располагаемого объекта испытаний, не меньшую 60 Гц. Выполнение этих требований потребовало разработки оригинальной конструкции УПП, которая защищена патентом на изобретение [4]. Для обеспечения статической компенсации силы тяжести УПП вместе с объ-

ектом испытаний при частоте собственных колебаний этой системы как твердого тела, не превышающей 5 Гц, используются четыре двухкамерные пневмоподушки типа 203 (№ W01-M58-6985) производства фирмы “Firestone” (США).

Контроль положения СМ и УПП в процессе их статического уравнивания путем изменения давления в пневмоподушках с использованием регуляторов давления (фактически трехлинейных редукционных клапанов) с пропорциональным электрическим управлением осуществляется с помощью концевых выключателей и гироскопического датчика (инклинометра) для СМ и лазерных датчиков для УПП.

Пневматические схемы управления давлением в каждой из групп пневмоподушек системы статического уравнивания СМ и в каждой из гидроподушек системы статического уравнивания УПП практически идентичны. В качестве примера на рис. 3 показан фрагмент пневматической принципиальной схемы УТСВ, относящийся к одной из пневмоподушек системы статического уравнивания УПП.

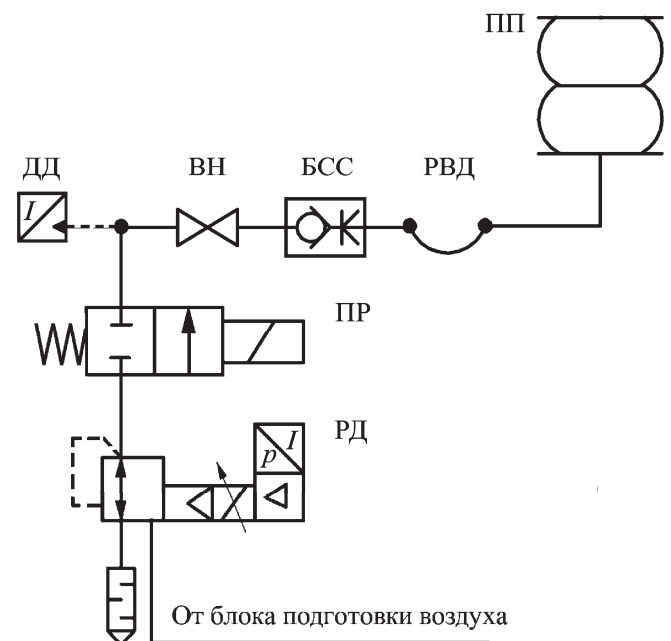


Рис. 3. Фрагмент пневматической принципиальной схемы универсального трехосевого сервогидравлического вибростенда:

РД – регулятор давления с пропорциональным электрическим управлением; ПР – пневмораспределитель; ДД – датчик давления; ВН – игольчатый кран; БСС – быстроразъемное соединение; РВД – рукав высокого давления; ПП – пневмоподушка

В соответствии с ТЗ в составе стенда использованы ССГП производства фирмы “Team Corporation” (США) в количестве пяти штук для создания вибраций в вертикальном направлении и четырех штук для создания вибраций в горизонтальном направлении (по две штуки в каждом из двух взаимно перпендикулярных направлений).

В каждый из ССГП входят: поршневой недифференциальный гидроцилиндр двухстороннего действия с двухсторонним штоком, гидростатическими опорами и датчиком положения штока; сервоклапан типа Team V20/V350/MBP350; два баллонных пневмогидравлических аккумулятора типа MBP-350 с номинальной вместимостью по 1,0 л каждый, один из которых подсоединен к напорному каналу сервоклапана, а другой – к его сливному каналу; гидростатический подшипник типа Team Model 50/2.8, предназначенный для передачи силового воздействия от гидроцилиндра к УПП во всем диапазоне развиваемых усилий только в направлении испытаний с обеспечением в определенных диапазонах подвижности по остальным пяти степеням свободы.

Гидроцилиндры Team 62/10,0, входящие в состав ССГП, используемых для создания вибраций в вертикальном направлении, имеют эффективную площадь поршня $A_{п.в} = 64,516 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а гидроцилиндры Team 62/18,2, входящие в состав ССГП, используемых для создания вибраций в горизонтальном направлении, имеют эффективную площадь поршня $A_{п.г} = 116,1288 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

При этом согласно ТЗ давление рабочей жидкости в напорной гидролинии силовых насосов должно быть не менее 20,7 МПа, а суммарная подача силовых насосов – не менее 900 л/мин.

Данные о параметрах вибрации, подлежащих воспроизведению на стенде с объектом испытаний, приведены в табл. 1.

Результаты проверочных и проектировочных расчетов

Анализ параметров вибраций, подлежащих воспроизведению на стенде, показывает, что наиболее напряженным с энергетической точки зрения

1. Параметры вибраций

Параметр	Числовое значение
Диапазон воспроизводимых частот вибраций, Гц	5 ... 310
Максимальные развиваемые ускорения УПП с объектом испытаний, м/с ² : при синусоидальной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении при широкополосной случайной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении	 17,85 7,36 8,04 8,14
Максимальные (пиковые) развиваемые скорости УПП с объектом испытаний, м/с: при синусоидальной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении при широкополосной случайной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении	 0,57 0,22 0,24 0,08
Максимальные (от пика до пика) перемещения УПП с объектом испытаний, мм: при синусоидальной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении при широкополосной случайной вибрации в вертикальном направлении в горизонтальном направлении	 36,20 14,30 9,42 9,45

является режим проведения испытаний с созданием синусоидальных вибрационных воздействий в вертикальном направлении (вибрационные испытания в каждом из трех возможных направлений не совмещаются во время работы стенда) с максимальными значениями ускорений и скоростей, равными соответственно: $a_{в.мах} = 17,85 \text{ м/с}^2$ и $v_{в.мах} = 0,57 \text{ м/с}$ (см. табл. 1). Диаграмма нагрузки [5], соответствующая указанному режиму испытаний, показана на рис. 4 (график 1). На диаграмме нагрузки выносками 2 и 3 выделены точки комбинаций значений скорости $v_{в}$ движения штоков гидроцилиндров вертикальных ССП и суммарной силы R на штоках, необходимой для обеспечения движения с этой скоростью, при которых мощность, которая должна подводиться к гидроцилиндрам вертикальных ССП и называемая далее потребной мощностью, имеет максимальные значения.

Согласно выполненным расчетам при использовании сервоклапанов типа Team V20/V350/MBP350 и

открытии их рабочих окон на максимальную величину механическая характеристика гидропривода для создания вибраций в вертикальном направлении (см. рис. 4, график 4), представляющая собой зависимость скорости движения $v_{расп}$ его выходного звена от силы R , действующей на это звено, позволяет с запасом осуществить все необходимые параметры вибраций, подлежащие реализации на стенде. При этом точки касания графика механической характеристики гидропривода при минимально возможной максимальной проводимости рабочих окон сервоклапанов (график 5) и диаграммы нагрузки не соответствуют режимам максимальной потребной мощности. Это указывает на то, что при применении рекомендованных в ТЗ гидрооборудования и рабочем давлении параметры гидропривода вибростенда не являются оптимальными [6].

Максимальный потребный расход рабочей жидкости, которая должна подводиться к гидроцилиндрам в процессе работы стенда, соответствует

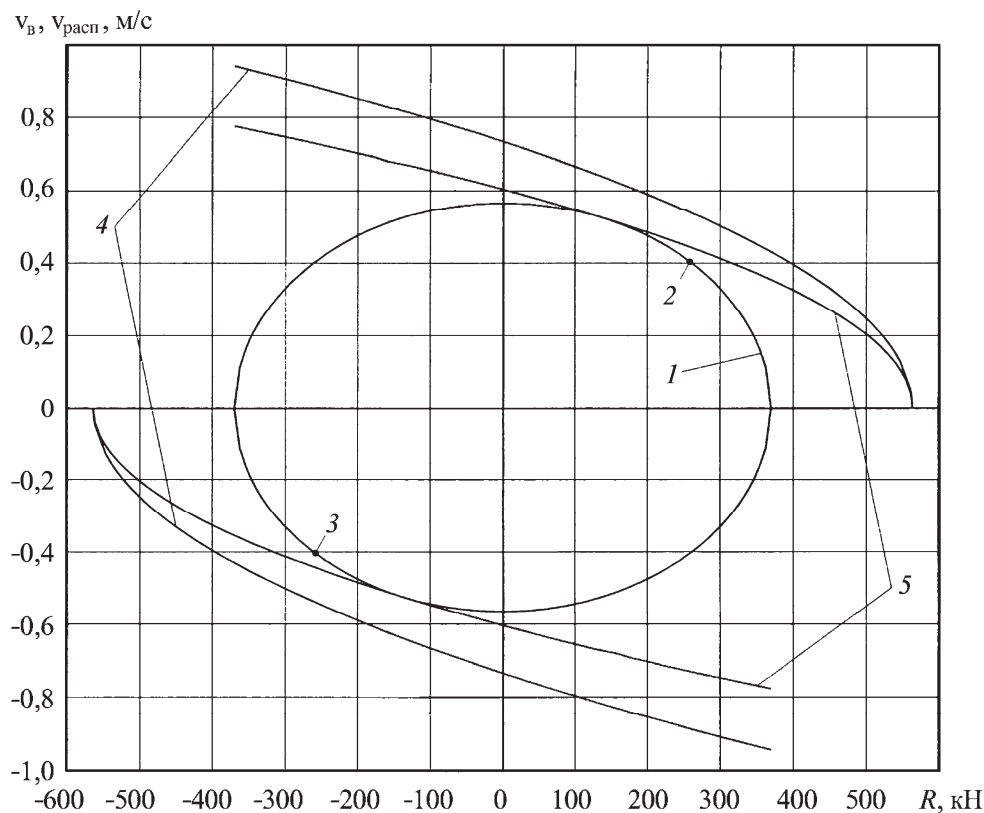


Рис. 4. Характеристики работы универсального трехосевого сервогидравлического вибростенда для случая создания вибраций в вертикальном направлении:

1 – диаграмма нагрузки $v_{в} = v_{в}(R)$ при $a_{в.мах} = 17,85 \text{ м/с}^2$ и $v_{в.мах} = 0,57 \text{ м/с}$; 2, 3 – точки диаграммы нагрузки 1, соответствующие комбинациям значений $v_{в}$ и R , при которых потребная мощность имеет максимальные значения; 4 – механическая характеристика $v_{расп} = v_{расп}(R)$ гидропривода при максимальной проводимости рабочих окон сервоклапанов; 5 – механическая характеристика $v_{расп} = v_{расп}(R)$ гидропривода при минимально возможной максимальной проводимости рабочих окон сервоклапанов

проведению вибрационных испытаний в вертикальном направлении при $v_{в.макс} = 0,57$ м/с и составляет (без учета утечек и перетечек рабочей жидкости, а также упругих деформаций элементов стенда) $Q_{в.макс} = 1103,2$ л/мин при среднем за цикл значении расхода $Q_{в.ср} = 702,3$ л/мин.

Поскольку по ТЗ суммарная подача силовых насосов должна быть не менее 900 л/мин, то в составе НАУ стенда используются четыре аксиально-поршневых регулируемых насоса (с регуляторами давления с внешним управлением) типа 415.0.250.DRG производства ОАО «Пневмострой-машина» (г. Екатеринбург).

При рабочей частоте вращения вала приводящего электродвигателя указанных насосов, равной $n_n = 960$ мин⁻¹, с учетом объемного коэффициента полезного действия (КПД) насосов $\eta_o = 0,95$ их суммарная подача $Q_{н.с}$ при номинальном значении рабочего объема $q_n = 250$ см³/об составляет $Q_{н.с} = 912$ л/мин.

Поскольку даже при максимальном значении рабочего объема выбранных силовых насосов их суммарная подача $Q_{н.с} = 912$ л/мин меньше максимального потребного расхода рабочей жидкости $Q_{в.макс} = 1103,2$ л/мин, то для компенсации недостаточной подачи насосов в моменты, когда возникает необходимость в повышенных значениях расхода, используются *пневмогидравлические аккумуляторы (ПГА)*. Пневмогидравлические аккумуляторы также необходимы для сглаживания пульсаций давления, обусловленных инерционностью работы регуляторов давления силовых насосов. В соответствии с указанными обстоятельствами и с учетом значительного расстояния (порядка 50 м) от НАУ до места расположения ССГП целесообразно иметь ПГА, установленные как в непосредственной близости от насосных агрегатов, так и в непосредственной близости от ССГП.

Очевидно, что при прочих равных условиях наиболее высокие требования к значению номинальной вместимости ПГА предъявляются в том случае, когда амплитуды изменения как перемещения, так и скорости движения поршней гидроцилиндров ССГП имеют максимальные значения.

Согласно данным, приведенным в табл. 1, наибольшая амплитуда перемещения соответствует случаю осуществления синусоидальных вибраций в вертикальном направлении и составляет $z_{в.макс} = 18,1$ мм = 0,0181 м.

При синусоидальном законе вибраций амплитудные значения скорости $v_{в.макс} = 0,57$ м/с и перемещения $z_{в.макс} = 0,0181$ м связаны следующим образом:

$$v_{в.макс} = \omega z_{в.макс}.$$

Соответственно, для рассматриваемого случая угловая частота синусоидальных вибраций ω составляет:

$$\omega = \frac{v_{в.макс}}{z_{в.макс}} = \frac{0,57}{0,0181} \text{ рад/с} = 31,49 \text{ рад/с}.$$

На основании расчетов, посвященных определению необходимой номинальной вместимости ПГА, для установки в области стенда (на минимально допустимом по конструктивным соображениям удалении от ССГП) были выбраны два пневмогидравлических баллонных аккумулятора типа AS35P360CA9V-1-11-C0C0/0 («EPE ITALIANA s.r.l.», Италия). Данные ПГА рассчитаны на номинальное давление $p_{ном} = 36,0$ МПа, каждый из них имеет номинальную вместимость $V_{а.н} = 35$ л.

Дополнительно еще один подобный (из соображений унификации) ПГА был установлен в непосредственной близости от силовых насосов 415.0.250.DRG и присоединен своей жидкостной полостью к их общей напорной гидролинии для компенсации инерционности регуляторов давления насосов и поддержания на выходе указанных насосов практически постоянного давления.

В целях предварительной оценки эффективности установки ПГА с номинальной вместимостью по 35 л в непосредственной близости от ССГП проведено имитационное моделирование с использованием пакета прикладных программ ПРАНС-ПК [7].

Моделирование процессов, происходящих в напорной гидролинии стенда, выполнено для случая синусоидального закона изменения расхода рабочей жидкости на входе ССГП, соответствующего изменению вертикальной скорости перемещения УПП с объектом испытаний по закону

$$v_{в} = v_{в.макс} \sin(\omega t).$$

При математическом моделировании длинные трубопроводы были представлены как совокупность нескольких последовательно соединенных коротких участков, для потока на каждом из которых использована сосредоточенная модель движения жидкости, соответствующая Г-образной схеме

замещения [5, 8]. Реальная рабочая жидкость рассматривалась как жидкостногазовая смесь. При проведении исследований было принято, что температура жидкостногазовой смеси и масса газа, находящегося в жидкости в нерастворенном состоянии, при изменении давления не меняются, а модуль объемной упругости дегазированной рабочей жидкости является линейной функцией текущего значения давления жидкости.

Согласно результатам расчетов по сравнению со случаем, когда используются лишь входящие в состав каждого ССПГ (со стороны их напорного канала) баллонные пневмогидравлические аккумуляторы вместимостью по 1 л, при прочих равных условиях при давлении зарядки всех ПГА, равном $p_3 = 12,0$ МПа, размах колебаний давления на входе ССПГ снижается с 1,155 МПа до значения 0,234 МПа при использовании одного дополнительного пневмогидравлического аккумулятора с номинальной вместимостью 35 л и до значения 0,132 МПа при использовании двух таких дополнительных аккумуляторов, а при давлении зарядки всех ПГА, равном $p_3 = 19,5$ МПа, – с 0,942 МПа до значения 0,174 МПа при использовании одного дополнительного пневмогидравлического аккумулятора с номинальной вместимостью 35 л и до значения 0,097 МПа при

использовании двух таких дополнительных аккумуляторов.

В качестве примера на рис. 5 приведены графики переходных процессов, полученные при моделировании для случая подключения к входному каналу ССПГ двух ПГА при давлении зарядки всех ПГА, равном $p_3 = 19,5$ МПа.

Для аналогичного режима испытаний также выполнен расчет колебаний давления на выходе ССПГ при постоянном давлении на выходе сливного трубопровода, поддерживаемом посредством соответствующего переливного клапана и равном $p_{\text{подп}} = 1,2$ МПа, и давлении зарядки пневмогидравлических аккумуляторов, установленных на выходе ССПГ, равном $p_3 = 1,1$ МПа.

При прочих равных условиях по сравнению со случаем, когда используются лишь входящие в состав каждого ССПГ (со стороны их сливного канала) баллонные пневмогидравлические аккумуляторы вместимостью по 1 л, размах колебаний давления на выходе ССПГ, согласно результатам расчетов, снижается с 0,072 МПа до значения 0,036 МПа при использовании одного дополнительного ПГА с номинальной вместимостью 10 л. Учитывая данный результат, признано целесообразным подключение к сливной гидролинии ССПГ

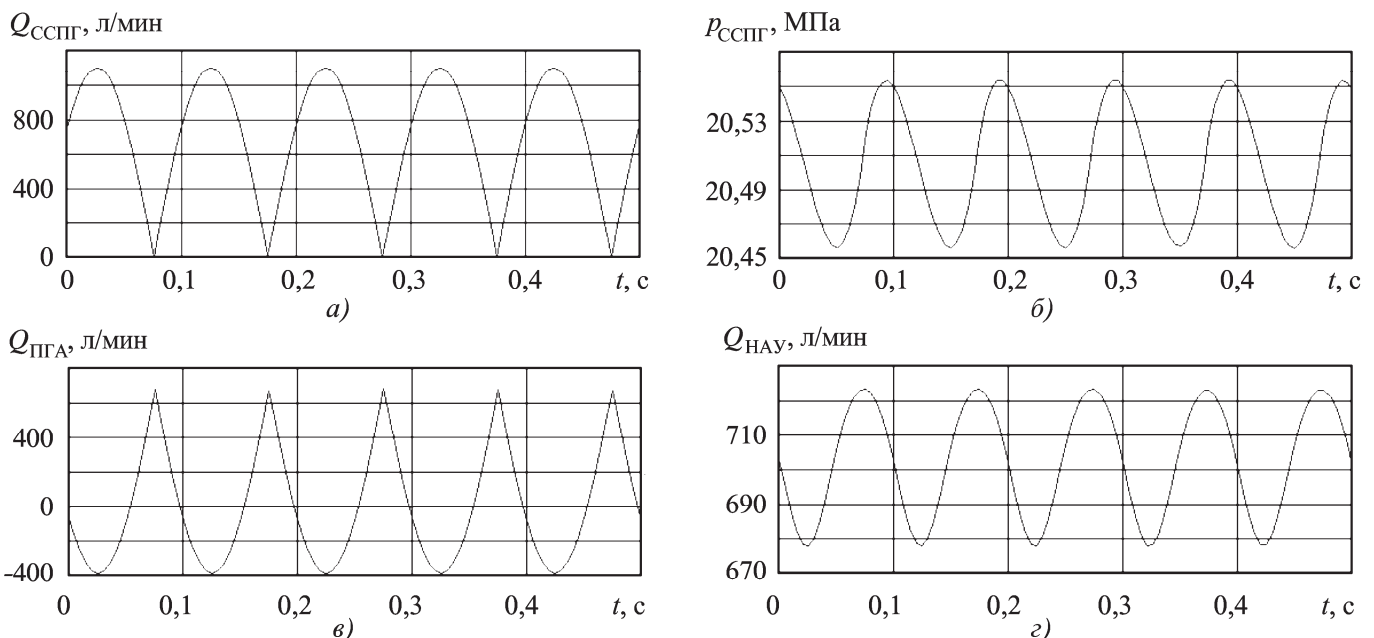


Рис. 5. Графики изменения в функции времени t :

a – суммарного расхода $Q_{\text{ССПГ}}$ жидкости на входе ССПГ; b – давления $p_{\text{ССПГ}}$ жидкости на входе ССПГ; v – суммарного расхода $Q_{\text{ПГА}}$ жидкости на входе ПГА; z – расхода $Q_{\text{НАУ}}$ жидкости на выходе НАУ

пневмогидравлического баллонного аккумулятора типа AS10P360CA9V-1-11-C0C0/0 (“ЕРЕ ITALIANA s.r.l.”, Италия), имеющего номинальную вместимость $V_{a.n} = 10$ л.

Экспериментальное апробирование работы стенда в период пуско-наладочных работ показало, что использование выбранных ПГА обеспечивает высокую стабильность значений давления в напорной гидролинии силовых насосов и в напорных и сливных каналах ССП на всех возможных режимах испытаний.

Заключение

Расчеты энергетических и динамических характеристик гидравлической и пневматической систем вибростенда, проведенные на этапе его проектирования, позволили обоснованно решить все вопросы выбора параметров этих систем.

Приемо-сдаточные испытания стенда подтвердили соответствие характеристик его работы требованиям технического задания и целесообразность принятых технических решений.

Библиографический список

1. Соустин Б. П., Тестоедов Н. А., Рудометкин А. Г., Алькин А. В. Виброиспытания космических аппаратов / М.: Наука, 2000. 171 с.
2. Парафес С. Г., Туркин И. К. Методы и средства динамических испытаний конструкций летательных аппаратов: учеб. пособ. М.: Изд-во МАИ, 2002. 132 с.
3. Скорина С. Ф. Испытания изделий авиационной, ракетной и космической техники: учеб. пособ. СПб: Изд-во ГУАП, 2017. 137 с.
4. Патент РФ № 2769895. Платформа вибростенда / Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Сапожников С. Б., Кувайцев А. В., Ларин О. В. // Оpubл. в Б.И. 2022. № 10.
5. Гойдо М. Е. Проектирование объемных гидроприводов (Б-ка конструктора). М.: Машиностроение, 2009. 304 с.

Запись для цитирования статьи:

Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Гойдо М. Е., Ларин О. В., Староверов Ю. А. Гидравлический стенд для вибрационных испытаний космических аппаратов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2025. № 2. С. 15 – 22. DOI: 10.14489/hb.2025.02.pp.015-022

Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Goydo M. E., Larin O. V., Staroverov Yu. A. (2025). Hydraulic Stand for Vibration Testing Spacecrafts. Spravochnik. Inzhenerniy zhurnal s prilozheniem, (2), 15 – 22. [in Russian language]. DOI: 10.14489/hb.2025.02.pp.015-022

6. Гойдо М. Е. Элементы теории гидропривода с дроссельным управлением // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2009. № 11. С. 14–18. 2010. № 1. С. 18.

7. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / Бажин И. И., Беренгард Ю. Г., Гайцгори М. М. и др.; под общ. ред. Ермакова С. А. М.: Машиностроение, 1988. 312 с.

8. Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Гойдо М. Е., Староверов Ю. А. Расчет гидравлического удара при работе ковочного пресса // Гидравлика: Сетевое издание. 2023. № 19 (июнь). 10 с. <http://hydrojournal.ru/item/217-raschet-gidravlicheskogo-udara-pri-rabote-kovochnogo-pressa>

References

1. Soustin B. P., Testoev N. A., Rudometkin A. G., Al'kin A. V. (2000). *Vibration testing of spacecraft*. Moscow: Nauka. [in Russian language]
2. Parafes' S. G., Turkin I. K. (2002). *Methods and means of dynamic testing of aircraft structures: textbook*. Moscow: Izdatel'stvo MAI. [in Russian language]
3. Skorina S. F. (2017). *Testing of aviation, rocket and space technology products: textbook*. Saint Petersburg: Izdatel'stvo GUAP. [in Russian language]
4. Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Sapozhnikov S. B., Kuvaytsev A. V., Larin O. V. (2022). Vibration platform. *Ru Patent No. 2769895. Russian Federation*. [in Russian language]
5. Goydo M. E. (2009). *Design of volumetric hydraulic drives (design kit)*. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian language]
6. Goydo M. E. (2009). Elements of the theory of hydraulic drive with throttle control. *Spravochnik. Inzhenerniy zhurnal s prilozheniem*, 11(1), 14 – 18. [in Russian language]
7. Ermakov S. A. (Ed.), Bazhin I. I., Berengard Yu. G., Gaytsgori M. M. et al. (1988). *Automated design of mechanical engineering hydraulic drive*. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian language]
8. Bodrov V. V., Bagautdinov R. M., Goydo M. E., Staroverov Yu. A. (2023). Calculation of hydraulic shock during operation of a forging press. *Gidravlika: Setevoe izdanie*, 19. Retrieved from <http://hydrojournal.ru/item/217-raschet-gidravlicheskogo-udara-pri-rabote-kovochnogo-pressa> [in Russian language]