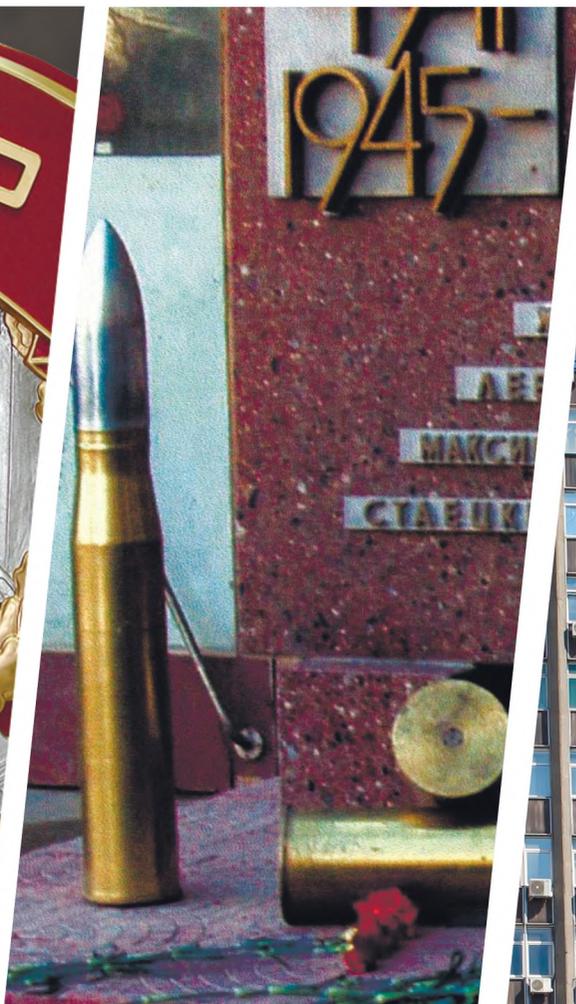




НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

# ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»



Выпуск №6

2018

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ  
ВЕСТНИК «НПО «ТЕХНОМАШ»**

Учредитель: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ТЕХНОМАШ»

Генеральный директор: Д. В. Панов  
Первый заместитель генерального директора: И. С. Рубцов  
Заместитель генерального директора по научной работе: А. В. Бараев

*Редакционная коллегия:*

Д.В. Панов  
И.С. Рубцов  
А.В. Бараев  
Х.И. Бичурин  
Д.А. Муртазин  
Д.В. Ковков  
Ю.М. Должанский  
Т.В. Наумов

*Экспертная комиссия №1:*

А.Н. Михайлов  
К.Г. Данилова

*Выпускающий редактор*

Г.А. Аношкина

*Научный редактор*

В.Г. Бещеков

*Верстка и дизайн*

С.В. Плясова

На сайте ФГУП «НПО «Техномаш» <http://www.tmnpo.ru> в открытом доступе представлены:  
электронная версия, содержание, аннотации и необходимая информация об авторах

Адрес: 127018, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, дом 40, ФГУП «НПО «Техномаш»  
Телефон: +7 (495) 689-95-04, факс: +7 (495) 689-73-45  
E-mail: [info@tmnpo.ru](mailto:info@tmnpo.ru), web-site: <http://www.tmnpo.ru>

Тираж: не более 999 экз.



## ◆ УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

2018 год ознаменован для нашего Предприятия двумя юбилейными датами – 80-летием со дня образования и 100-летием со дня рождения Министра общего машиностроения СССР С.А. Афанасьева, чьё имя с гордостью носит ФГУП «НПО «Техномаш».

Мы высоко ценим творческий подъём и увлечённость, мужество и стойкость генеральных конструкторов – С.П. Королёва, В.Н. Челомея, В.П. Макеева, М.К. Янгеля, В.П. Глушко, М.В. Решетнева, Н.А. Семихатова, Н.А. Пилюгина, В.П. Бармина, А.М. Исаева, В.И. Кузнецова, М.С. Рязанского и многих других, которые вместе с научными коллективами стремились к осуществлению амбициозных целей освоения космоса человеком, в числе которых пилотируемый облёт и высадка экспедиции на Луну, создание пилотируемой многоцелевой станции на околоземной орбите, пилотируемый полёт к Марсу, полёты автоматических станций к планетам Солнечной системы и вне её, а также укрепляли оборонную мощь государства.

В Минобщемаш СССР был накоплен огромный положительный опыт тематического планирования НИОКР и контроля важнейших ОКР, а также руководства опытными и серийными предприятиями отрасли.

Сегодня вновь поднимаются вопросы планирования, управления и оперативного контроля НИОКР и серийным производством изделий, так как задача стоит в переходе к «цифровым» предприятиям и «цифровой» экономике.

Соединив положительное в производственных системах, создаваемых в настоящее время в ракетно-космической отрасли и построенных ранее в Минобщемаше СССР, Госкорпорация «Роскосмос» будет высокими темпами идти к «цифровой» экономике предприятий и холдингов.

Шестой выпуск научно-технического бюллетеня «Вестник «НПО «Техномаш» мы посвящаем нашим планам и целям в 2018 году.



И.о. генерального директора

Д.В. Панов

## СОДЕРЖАНИЕ

### ◆ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РКП

*Кондратенко А.Н., Олексенко И.А., Панов Д.В.*

О новых подходах и о роли головных научно-исследовательских организаций по планированию и сопровождению реализации государственных и федеральных целевых программ в части производственно-технологического развития ракетно-космической промышленности .....4

*Губертov А.М., Кошлаков В.В., Мосолов С.В., Смирнов Ю.Л.*

Высокий уровень технологий – необходимое условие реализации инвестиционных проектов в ракетном двигателестроении .....9

### ◆ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И ПАЙКИ

*Чичков С.А., Кулик В.И.*

Новое поколение малогабаритных камерных головок закрытого типа для орбитальной сварки стальных трубопроводов диаметрами 14-18 мм в стеснённых монтажных условиях.....14

*Портных А.И., Кулик В.И., Маркин К.Н., Бецеков В.Г., Бочаров Ю.А.*

Исследование режимов и применяемых материалов при пескоструйной обработке перед нанесением теплозащитных и других покрытий КС ЖРД .....17

### ◆ НАНОТЕХНОЛОГИИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Панов Д.В., Семенов В.В., Тельнов О.В., Егоров А.В., Ахмедов Ф.А., Быков А.А., Кондратенко А.А. (ФГУП «НПО «Техномаш»); Ризаханов Р.Н., Агуреев Л.Е. (ГНИЦ ФГУП «Центр Келдыша»); Кенжагулов И.Ю., Степанова К.А. (НИЦ «Эталон»)*

Нанотехнологии в РКП.....20

### ◆ ОБРАЗОВАНИЕ И ОПЕРЕЖАЮЩАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ

*Муртазин Д.А., Бецеков В.Г.*

Стратегия развития аспирантуры и докторантуры во ФГУП «НПО «Техномаш» .....30

*Тарасов В.А., Штукатуров М.К., Ковков Д.В.*

«Русский метод обучения» или технологии в промышленности и образовании на примере взаимодействия ФГУП «НПО «Техномаш» и МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана .....31

*Бичурин Х.И., Ковков Д.В., Болдырев Д.А.*

Анализ и оценка результативности научной деятельности ФГУП «НПО «Техномаш» на основе баз данных научного цитирования .....35

### ◆ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ГИРОСКОПОВ И ПРИБОРОВ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

*Кузнецов В.С., Камалдинов А.М.*

Отработка комбинированной технологии корректировки масс при балансировке ротора двигателя-маховика.....38

### ◆ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ РКП

*Рахмилевич Е.Г., Черемисин Д.А., Новиков П.П., Шепелева В.Ю.,*

*Уразова Т.А., Фonusев В.Г., Чернодед И.И.*

Методическое обеспечение проведения технологического аудита (технологического обследования) на предприятиях РКП.....41

### ◆ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ

*Тюлевин С.В., Космодемьянский Е.В., Семененко Е.П., Вобликов Д.Н., Ткаченко А.С.*

Перспективные проекты и конструкторско-технологические проблемы разработки и изготовления современных средств выведения космических аппаратов.....44

◆ **ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Прусаков М.А.*

Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы .....46

*Вайцехович С.М., Бараев А.В.*

Паровые водотрубные котлоагрегаты с использованием  
спирально-профильных труб для морских надводных и подводных судов .....50

*Овечкин Л.М., Кривенко Г.Г.*

Анализ процесса интенсивной пластической деформации для получения ультрамелкозернистых  
структур .....52

*Харсеев В.Е., Кривенко Г.Г., Миронов В.В., Овечкин Л.М.*

Инновационное решение изготовления осесимметричных оболочковых деталей .....55

*Бецкоков В.Г., Кулик В.И., Королёв А.Н., Щегольсков В.П., Харсеев В.Е., Кондауров А.Е.,  
Лесных Г.В., Сняжкова Т.И., Вайцехович С.М., Прусаков М.А.*

Исследование формообразования полусфер шаробаллонов сферодвижным деформированием .....57

◆ **ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*Кологов А.В., Усов Г.Л.*

Моделирование технологии испытаний изделий на герметичность .....59

*Усов Г.Л., Кологов А.В., Венгерский Э.В.*

Математическая модель движения жидкой среды по трубопроводу с проточным демпфером .....61

*Кологов А.В., Соловьев В.Н., Тихомиров К.А., Барышников В.И.*

Гелиевые контрольные течи для ракетно-космической промышленности .....66

◆ **ТЕХНОЛОГИИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РКТ**

*Бараев А.В., Илингина А.В., Рябчиков П.В.*

Новые цифровые технологии контроля в производстве изделий РКТ .....70

*Семенов В.В., Цырков А.В., Юрцев Е.С.*

«Индустрия 4.0» – новое в управлении жизненным циклом продукции .....73

◆ **ЭЛЕКТРОННАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ**

*Бараев А.В., Должанский Ю.М., Илингина А.В., Кочкин Е.В., Матвеев Е.В., Степанов В.В.,  
Любченко В.А.*

Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование,  
разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2017 году .....76

◆ **КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ**

*Щепетков Н.А., Макаров И.И., Кочкин Е.В.*

Современные технические средства контроля характеристик геометрии масс летательных  
аппаратов .....81

*Семенов В.В., Егоров А.В., Мазуркевич А.Н., Астахов Ю.П., Белов И.И., Богданов К.А.,  
Митрюшин Е.А., Перепечкин А.А., Фомичев А.О., Щегольсков В.П.*

Новая конструкция станка СЭХО-172М электрохимической обработки деталей  
ракетно-космической техники .....83

*Писаренко А.А., Ковалев А.М.*

Механообрабатывающий центр модели «СВО-3500» для формирования вафельного фона на  
крупногабаритных корпусных конструкциях изделий РКТ .....86

## ◆ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РКП

УДК 623:338.984

*Кондратенко А.Н., Олексенко И.А., Панов Д.В.*

### **О новых подходах и роли ГНИО по планированию и сопровождению реализации государственных и федеральных целевых программ в части производственно-технологического развития РКП**

Статья посвящена новой методологии оценки роли головных научно-исследовательских организаций в процессе планирования и сопровождения реализации государственных и федеральных целевых программ.

**Ключевые слова:** целевые программы, эффективность программ, механизм реализации программ.

Суть новых подходов по разработке и реализации государственных (ГП) и федеральных целевых программ (ФЦП), направленных на развитие ракетно-космической промышленности (РКП) в обеспечение выполнения целевых задач федеральных программ космической тематики и выполнения заданий государственной программы вооружения, заключается в повышении эффективности данных программ, совершенствовании процесса их разработки и сопровождения, ориентации на получение конечного результата.

Все космические проекты и программы, государственная программа вооружения анализируются и оцениваются по направлениям технической и функциональной новизны изделий боевой ракетной (БРТ) и ракетно-космической техники (РКТ), производственно-технологических возможностей РКП и производственно-технологической реализуемости программ, экономической эффективности и бюджетной целесообразности проектов и программ.

Проблема эффективного планирования, реализации и внедрения в производство результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по промышленным базовым и критическим технологиям, планирования, реализации, вводу в строй объектов реконструкции и технического перевооружения предприятий РКП, обеспечивающих производственно-технологическое развитие ракетно-космической отрасли, в настоящее время становится все более актуальной. Ракетно-космическая отрасль играет ведущую роль в обеспечении военной, социально-экономической и научной безопасности, оказывая существенное влияние на уровень военного, экономического и научного потенциалов Российской Федерации. Освоение космоса, ракетные технологии – это оборонный щит России, возможность раннего выявления глобальных природных катаклизмов, естественная основа для разработки новых технологий и получения современных материалов. Для решения этих и других задач требуются существенные финансовые вложения в технологическую модернизацию и развитие основных фондов РКП для создания РКТ, БРТ, а также в развитие наземной космической инфраструктуры.

До настоящего времени в целом по оборонно-промышленному комплексу (ОПК), как и в РКП, проводи-

лась фактическая «привязка» адресных инвестиционных программ к номенклатуре спецтехники, что являлось обоснованным и целесообразным, когда НИОКР и ограниченные капитальные вложения направлялись на решение «локальных задач» с выраженной предметно-технологической «привязкой» – фактически на решение проблем, связанных с расшивкой «узких мест» по разработке, отработке и производству модернизируемой или вновь осваиваемой отраслевой спецтехники. В ближайшей перспективе характер мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению объектов предприятий РКП, технологической модернизации производства и развитию промышленных технологий существенно изменится в сторону общетехнологической направленности, а программно-целевое планирование капитального строительства и развития промышленных технологий будет направлено на рациональное, экономически эффективное использование государственных средств, выделяемых на капитальное строительство и технологические НИОКР. В период до 2030 года должна быть проведена производственно-технологическая модернизация и техническое перевооружение РКП, основывающихся на современных эффективных принципах. На данном периоде отраслевого инвестиционного процесса в РКП предстоит строительство космодрома Восточный, реконструкция и техническое перевооружение инженерной инфраструктуры космодрома Байконур, строительство наземной космической инфраструктуры дальней связи и других объектов. На среднесрочную перспективу предусмотрены значительные капитальные вложения в предприятия, участвующие в создании новых и модернизируемых космических и боевых ракетных комплексов, а также значительные бюджетные инвестиции в разработку и внедрение промышленных базовых и критических технологий РКП – в период 2018–2025 гг. Ожидаемое ежегодное количество инвестиционных проектов в среднем составит примерно 150, технологических НИОКР – от 50 до 230. В настоящее время Госкорпорацией «Роскосмос» реализуется более 140 инвестиционных проектов по реконструкции и техническому перевооружению предприятий и более 55 технологических НИОКР.

В сложившихся условиях бюджетных ограничений, внешнеполитической обстановки, необходимости про-



изводственно-технологической модернизации РКП актуальной является задача внедрения новых подходов (новые подходы) к разработке и реализации ГП, ФЦП, направленных на развитие РКП в обеспечение выполнения целевых космических задач и выполнения заданий ГПВ. Суть новых подходов заключается в повышении эффективности ГП и ФЦП, совершенствовании процесса их разработки и реализации, ориентации данных программ на получение конечного результата. В рамках таких подходов решается задача приведения в соответствие потребностей государства в военной и социально-экономической сферах, обеспечения безопасности и науки с его реальными возможностями по реализации ГП и ФЦП в условиях быстроменяющейся внешнеполитической обстановки и сложной экономической ситуации, а также с учётом потребностей рынка космических услуг и планов военно-технического сотрудничества Российской Федерации с иностранными государствами.

Методологической основой реализации новых подходов являются программно-целевые методы, лежащие в основе организационно-методического обеспечения работ по разработке и управлению реализацией ГП и ФЦП в части производственно-технологического развития РКП. Решение вопросов производственно-технологического развития РКП, внедрением и реализацией новых подходов, а также адаптацией программно-целевых методов к современным условиям в настоящее время осуществляется Госкорпорацией «Роскосмос», ФГУП «НПО «Техномаш» и рядом других головных научно-исследовательских организаций (ГНИО) РКП. На этапе формирования ГП «Развитие ОПК» (ГП ОПК) на 2018–2025 гг. в части РКП с учётом требований новых подходов к формированию ФЦП и ГП (в том числе с учётом требований действующих нормативно-правовых документов [1–5]), сформулированы и реализуются на практике основные подходы формирования программных мероприятий ГП ОПК:

- обеспечение выполнения прямых поручений Президента РФ, Правительства Российской Федерации или решений Военно-промышленной Комиссии Российской Федерации;
- производственно-технологическое обеспечение выполнения ГПВ;
- взаимосвязка мероприятий проекта ГП ОПК с мероприятиями ГПВ, перечнем промышленных базовых и критических технологий до 2025 года, а также с мероприятиями государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы» (ГП КДР), Федеральной космической программой России (ФКПР) на 2016–2025 гг., Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (ФЦП «Глонасс»);
- обеспечение обязательного внедрения в производство результатов разрабатываемых технологий;
- сосредоточение основных бюджетных ресурсов на финансирование НИОКР;

- обеспечение достижения целевых показателей Стратегии развития Госкорпорации «Роскосмос» до 2030 года;

- включение в состав предложений в проект ГП ОПК переходящих мероприятий, завершаемых в ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011–2020 годы» (ФЦП ОПК), ГП ОПК на 2016–2020 гг.;

- учёт результатов инвентаризации инвестиционных проектов и НИОКР, а также данных, полученных в ходе проведения технологического аудита;

- согласование технологических НИОКР и инвестиционных проектов по капитальному строительству головными предприятиями-разработчиками образцов БРТ, РКТ и генеральными конструкторами по видам вооружения, военной и специальной техники.

На основе сформулированных подходов в июне–июле 2017 г. сформирован сводный перечень мероприятий РКП по инвестиционным проектам и НИОКР по ГП ОПК на 2018–2025 гг. [6]. В целях обеспечения эффективности разработки, корректировки и реализации ГП, ФЦП, государственного оборонного заказа (ГОЗ) в части капитальных вложений, федеральной адресной инвестиционной программы (ФАИП) при проведении мероприятий по реконструкции, техническому перевооружению и новому строительству объектов организаций РКП, с учетом требований действующей нормативно-правовой базы [7, 8], разработан и проходит согласование проект положения «Об организации в Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» работы по формированию ФАИП и реализации мероприятий по строительству, реконструкции и (или) техническому перевооружению объектов, государственным заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос», которое является обобщением и уточнением действующего положения о реализации ФАИП [9]. Проект положения с учётом новых подходов включает в себя все этапы формирования и корректировки инвестиционных программ по капитальным вложениям, подготовки отчётности по ним. В целях обеспечения координации работ, повышения эффективности, ответственности и усиления роли головных организаций Госкорпорации «Роскосмос» по технологическому сопровождению программ создания РКТ в 2016 г. введён в действие приказ «Об организации работ по технологическому и материаловедческому сопровождению программ создания РКТ» [10], регламентирующий головную роль ФГУП «НПО «Техномаш» по координации работ ГНИО отрасли и предприятий (организаций) РКП по технологическому сопровождению программ создания РКТ, в том числе по разработке и сопровождению перечня мероприятий производственно-технологической направленности ГП и ФЦП, ГОЗ и ФАИП на основе анализа предложений предприятий (организаций) РКП и координации их реализации. Реализация [10] – эффективный способ решения задачи по взаимной увязке, согласованности работ производственной и технологической направленности в рамках ГП КДР на 2013–2020 гг.,

ГП ОПК на 2018–2025 гг., ГПВ, ФКПР на 2016–2025 гг., ФЦП «Глонасс» и других ФЦП космической тематики. Все это наряду с обеспечением запланированных (планируемых) в полном объеме ресурсов позволит выполнить программы и создать реальные условия эффективной реализации ГОЗ.

ГОЗ – эффективный механизм и инструмент реализации ГПВ, ГП ОПК, ГП КДР, ФКПР и других ФЦП космической тематики, является одной из основных составляющих программно-целевого планирования создания средств вооружения и военной техники, средств выведения и космической техники, производственно-технологического развития РКП. Впервые ГОЗ утверждён Правительством Российской Федерации в 1992 г. В 1994 г. (до 1994-го ГОЗ не имел своего нормативного правового поля) определено [11], что поставки продукции в целях поддержания необходимого уровня обороны и безопасности государства являются поставками продукции для федеральных государственных нужд. В развитие данного федерального закона в 1995 г. определены особенности формирования и реализации закупки и поставки продукции для федеральных государственных нужд [12]. ГОЗ

формируется на основе ГП и ФЦП и обеспечивает решение задачи по взаимной увязке, согласованности работ в рамках ГПВ, ГП ОПК, ГП КДР, ФКПР и других ФЦП космической тематики.

Основные работы по разработке и внедрению технологических НИОКР, по реконструкции и техническому перевооружению предприятий РКП и смежных отраслей ОПК для обеспечения выполнения целевых задач программ космической тематики и ГПВ выполняются в основном по четырём программам – ГП ОПК на 2016–2020 гг., ФЦП ОПК на 2011–2020 гг., ФКПР, ФЦП «Глонасс». Наибольший вклад мероприятий по реконструкции и техническому перевооружению, разработке и внедрению технологических НИОКР в РКП сосредоточен в рамках программных мероприятий по развитию ОПК (рис. 1, 2).

В настоящее время планирование и сопровождение мероприятий государственных и федеральных целевых программ развития оборонно-промышленного, государственных и федеральных целевых программ космической тематики, в части производственно-технологического развития РКП, системно организовано и осуществляется

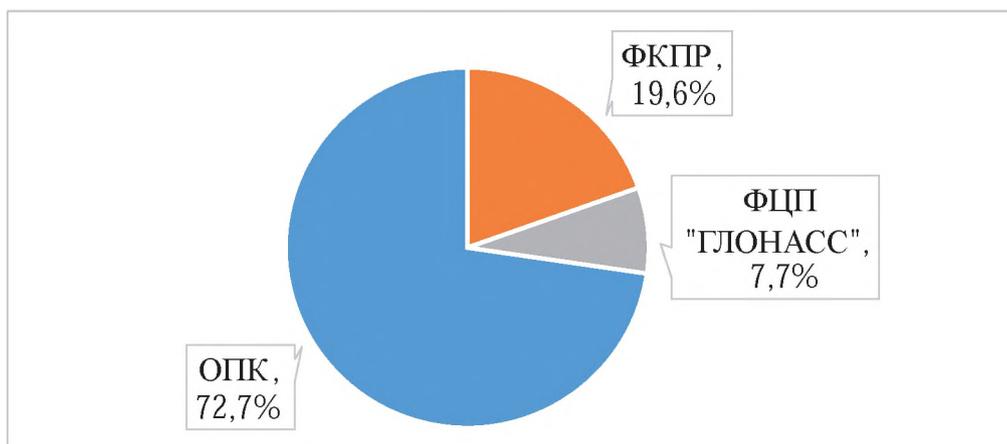


Рис. 1. Соотношение бюджетного финансирования технологических НИОКР по различным программам в 2011–2020 гг.

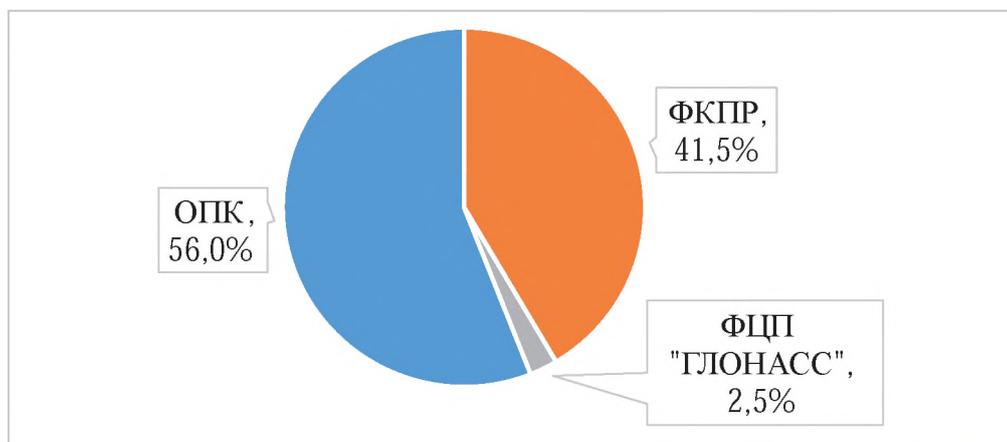


Рис. 2. Соотношение бюджетного финансирования инвестиционных проектов по реконструкции и техническому перевооружению предприятий по различным программам в 2011–2020 гг.



на постоянной основе ФГУП «НПО «Техномаш» с привлечением головных научно-исследовательских организаций (ГНИО) РКП, генеральных конструкторов по созданию вооружения, военной и специальной техники, научно-исследовательских институтов Минобороны России, а также в рамках работы рабочих групп и комиссий, ежегодно создаваемых приказами и распоряжениями Госкорпорации «Роскосмос» [6, 13, 14].

Исторически сложилась и успешно реализуется более 60 лет следующая кооперация головных организаций и организация совместных работ программно-целевого планирования и научно-технического сопровождения программ – любые космические проекты и программы, ГПВ анализируются и оцениваются по следующим основным направлениям:

- техническая и функциональная новизна (головная организация ФГУП ЦНИИмаш);
- производственно-технологические возможности, производственно-технологическая реализуемость (ФГУП «НПО «Техномаш»);
- экономическая эффективность и бюджетная целесообразность (ФГУП «Организация «Агат»);
- с привлечением других ГНИО и предприятий РКП.

Для направления работ по производственно-технологическому и институциональному развитию РКП при взаимодействии отраслевых головных институтов наиболее рациональным является распределение задач:

- по направлению деятельности ФГУП ЦНИИмаш:
  - определение основных задач отрасли по обеспечению надёжности и качества БРТ и РКТ, разработке, отработке и производству спецтехники (номенклатура, количество, сроки, функциональная новизна), созданию объектов наземной космической инфраструктуры на средний и долгосрочный период, доведение их до отраслевых институтов и головных организаций РКП;
  - формирование и разработка планов развития экспериментальной и стендовой базы для наземной экспериментальной отработки (НЭО) БРТ и РКТ [13];
  - рассмотрение и согласование исходных данных для проектирования объектов экспериментальной базы в части технологических процессов, трудоёмкости, циклограмм проведения аэрогидрогазодинамических, прочностных, динамических, климатических испытаний, отработки тепловых режимов изделий при НЭО, а также соответствия основных параметров реконструируемых или вновь сооружаемых объектов экспериментальной базы перспективным изделиям [13];
- по направлению деятельности ФГУП «НПО «Техномаш» (задачи, определённые приказом Госкорпорации «Роскосмос» «Об организации работ по технологическому и материаловедческому сопровождению программ создания ракетно-космической техники» [10] и др.:
  - проведение и организация технологического аудита и паспортизации, разработка предложений по повышению технологического уровня потенциала предприятий (организаций) РКП;

- оценка и экспертиза планов технического перевооружения РКП;

- разработка и сопровождение реализации перечней промышленных базовых и критических технологий РКП;
- экспертиза обоснований экономической целесообразности инвестиционных проектов, участие в согласовании заданий на проектирование в части соответствия предлагаемого к приобретению оборудования конструкторско-технологическим особенностям производства изделий, разработка ежегодных сборников нового оборудования, рекомендуемого для замены устаревшего с учётом технологической специализации производства РКТ в различных цехах;

- оказание методической помощи организациям РКП при разработке обоснований экономической целесообразности инвестиционных проектов;

- проведение оценки соответствия проектной трудоёмкости изготовления изделий-аналогов на передовых отечественных и зарубежных предприятиях РКП, разработка предложений (мероприятий) по внедрению прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих снижение трудоёмкости в сравнении с аналогами;

- проведение оценок по установлению достоверной количественной и качественной характеристики состояния основных производственных фондов;

- проведение оценок потребных капложений на воспроизводство основных производственных фондов организаций на средне- и долгосрочную перспективу;

- обобщение и систематизация технико-экономических показателей по объектам капитального строительства, разработка и поддержание в актуальном состоянии укрупнённых показателей стоимости строительства;

- по направлению деятельности ФГУП «Организация «Агат»:

- определение и прогнозирование динамики объёмов работ, численности работающих, себестоимости продукции (долговременная статистика);

- разработка критериев по оценке экономической эффективности средств, направляемых на капитальные вложения и технологические НИОКР;

- оценка возможных источников финансирования инвестиционных проектов и технологических НИОКР и др.

Эффективность формирования и сопровождения ГП и ФЦП во многом зависит, прежде всего от чёткого взаимодействия отраслевых институтов, организаций, отвечающих за отдельные направления технологии, материаловедения и ведущих организаций РКП на всех стадиях формирования и реализации программ. Выстраивание и организация такого рода взаимодействия в инвестиционной сфере по капитальному строительству, по разработке и внедрению промышленных технологий возможно и наиболее эффективно, по нашему мнению, лишь при руководящей и направляющей роли «блока промышленности» Госкорпорации «Роскосмос».

С учётом вышеизложенного представляется актуальным создание и работа во ФГУП «НПО «Техномаш» центра сводного планирования – отраслевого централизованного



ванного научно-технического подразделения, формирующего целевые задачи в области инвестиционной политики по капитальному строительству и развитию промышленных технологий предприятий (организаций) РКП, а также единый замысел по технологической модернизации предприятий РКП, осуществляющего с единых позиций информационно-аналитическое, нормативно-правовое и организационно-техническое сопровождение инвестиционных программ по капитальному строительству и технологическим НИОКР отрасли.

В настоящее время наиболее проблемными при осуществлении программно-целевого планирования производственно-технологического развития РКП являются вопросы:

- ГНИО отрасли фактически не формируют единую программу производства БРТ и РКТ различного назначения, которая соответственно не доводится до предприятий (организаций) РКП;
- отсутствует концепция и стратегии развития производственно-испытательной базы РКП и экспериментально-испытательной базы для НЭО БРТ и РКТ;
- в полном объеме не проработаны вопросы методологии и методики оптимизации производственно-технологического и экспериментально-испытательного потенциала отрасли, а также системно не определено понятие «оптимальное производство», отсутствует математическая постановка задачи оптимизации производственно-технологического и экспериментально-испытательного потенциала отрасли.

Ряд проблемных вопросов требует решения на межведомственном уровне. Так, например, действующая в настоящее время нормативно-законодательная база Российской Федерации по вопросам обороны не регламентирует в полном объеме участие РКП в процессах программно-целевого планирования и сопровождения развития БРТ и РКТ. До начала 90-х общая организация разработки ГПВ возлагалась на Комиссию по военно-промышленным вопросам при Совете Министров СССР, которая осуществляла координацию и распределение функциональных задач, решаемых Минобороны и ОПК. ГНИО РКП занимали при этом ведущие позиции при формировании Основных направлений развития вооружения и военной техники на 15-летний период и принимали полноправное и активное участие в формировании ГПВ на всех этапах разработки, а также в сопровождении ГПВ. В целом этот механизм достаточно эффективен, обеспечивает принятие и реализацию качественных, глубоко обоснованных и просчитанных решений по созданию и развитию БРТ и РКТ военного назначения.

В настоящее время процессы формирования и сопровождения ГПВ регламентируются в основном внутренними распорядительными документами Минобороны России. Фактически РКП принимает участие лишь на заключительной стадии формирования ГПВ в части БРТ и РКТ, получая на согласование полностью сформированную программу и не располагая достаточным временем для её детального рассмотрения. На практике

указанные обстоятельства обуславливают сложности процессов оптимизации производственно-технологических мощностей РКП, а также сложности формирования программы производства БРТ и РКТ военного назначения. Целесообразно разработать и утвердить межведомственное Положение по формированию и сопровождению ГПВ в части изделий РКТ и БРТ, где целесообразно по этим вопросам регламентировать порядок взаимодействия ГНИО РКП, головных НИИ Минобороны России и института генеральных конструкторов, а также порядок взаимодействия Госкорпорации «Роскосмос» и Минобороны России.

#### Список литературы

1. Основы государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу (утверждены Указом Президента Российской Федерации 23.02.2016 №91).
2. Основы государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу (утверждены Президентом Российской Федерации 19.04.2013 №Пр-906).
3. О разработке и реализации ГПВ (Указ Президента России от 02.07.2013 №599).
4. План первоочередных организационных мероприятий по формированию ГП ОПК 2018–2025 в Минпромторге России (приказ Минпромторга России от 30.05.2017 №1723).
5. Методические материалы по сбору исходных данных с целью формирования ГП ОПК 2018–2025 (распоряжение Минпромторга России от 16.06.2017 №РО-62).
6. Николаев В.Д., Лукьянчик В.В., Кондратенко А.Н., Гапоненко О.В., Кузин А.И., Олексенко И.А. Инвентаризация НИОКР и инвестиционных проектов, реализуемых в рамках ФЦП, как инструмент приоритизации программных мероприятий // НТБ Вестник «НПО «Техномаш». 2017. №3. С. 61–65.
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.06.1995 №594 О реализации федерального закона «О поставках продукции для федеральных государственных нужд».
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 13.09.2010 №716 Об утверждении Правил формирования и реализации федеральной адресной инвестиционной программы.
9. Приказ ФКА от 17.07.2012 №151 «О порядке реализации федеральной адресной инвестиционной программы при проведении мероприятий по строительству, (реконструкции, техническому перевооружению) предприятий, государственным заказчиком которых является Федеральное космическое агентство».
10. Приказ Госкорпорации «Роскосмос» от 23.08.2016 №168 Об организации работ по технологическому и материаловедческому сопровождению программ создания ракетно-космической техники.



11. Закон Российской Федерации от 13.12.1994 №60-ФЗ. О поставках продукции для федеральных государственных нужд.

12. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.06.1995 №594. О реализации федерального закона «О поставках продукции для федеральных государственных нужд».

13. Распоряжение генерального директора Госкорпорации «Роскосмос» от 23.11.2016 №КИ-225-рсп. Об орга-

низации работ по проведению инвентаризации выполняемых НИОКР и инвестиционных проектов, реализуемых в рамках федеральных целевых программ, заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос».

14. Распоряжение Госкорпорации «Роскосмос» от 15.06.2017 №ЮВ-157-рсп. О рабочей группе по формированию предложения в проект государственной программы Российской Федерации «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2018–2025 гг.».

УДК 629.78:621.454.2.01

*Губерт А.М., Кошлаков В.В., Мосолов С.В., Смирнов Ю.Л.*

### **Высокий уровень технологий – необходимое условие реализации инвестиционных проектов в ракетном двигателестроении**

В работе рассматриваются перечень боевых ракетных комплексов на жидкостных ракетных двигателях и ракетных двигателях твёрдого топлива, а также двигательные установки космического назначения, детали, изготовленные из композиционных материалов.

**Ключевые слова:** боевые ракетные комплексы, жидкостные ракетные двигатели, ракетные двигатели твёрдого топлива, двигательные установки космического назначения.

Важнейшей задачей развития ракетно-космической отрасли является создание и совершенствование всех видов ракет как боевых, так и ракет гражданского назначения. При этом создание и совершенствование ракет развивалось по нескольким направлениям. Основное направление включало в себя ракеты на «жидком» и «твёрдом» топливе. После проведения работ по научному обеспечению разработок жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на стабильных компонентах топлива с высокими энергомассовыми характеристиками и высокой надёжностью был закрыт целый ряд сложнейших проблем, связанных с обеспечением устойчивости, регулирования, запуском ЖРД под водой (для морских БРК), с миномётным стартом ракет, и тем самым внесён большой вклад в создание высокосовремен-

ных боевых ракет наземного и морского базирования УР-100, Р-36, Р-29, Р-29Р, Р-29РМ и их модификаций.

В обеспечение создания ракетных двигателей твёрдого топлива (РДТТ) разработаны и внедрены в практику методики расчёта теплообмена и теплозащиты РДТТ, выбора рецептур твёрдых топлив, теплозащитных и эрозиястойких материалов, усовершенствованы методы и средства отработки РДТТ и обеспечения работоспособности органов управления вектором тяги. Эти работы внесли значительный вклад в успешное создание высокоэффективных боевых ракетных комплексов (БРК) наземного и морского базирования с твёрдотопливными межконтинентальными баллистическими ракетами (МБР).



Рис. 1. Боевые ракетные комплексы на ЖРД



Рис.2. Боевые ракетные комплексы на РТТ

В условиях экономической напряжённости в стране особое значение придавалось созданию и развитию всех типов ракетных двигателей (РД). Работы проводились на упреждение. Нельзя было допустить отставания в этой области, поэтому особое внимание уделялось технологиям создания ракетных комплексов (РК) и двигателестроению. При этом двигательные установки создавались по двум направлениям – термохимическое и ядерное. Каждый из указанных типов имеет свои преимущества и недостатки и может применяться в определённых условиях. В настоящее время космические корабли, орбитальные

станции и беспилотные спутники Земли выводятся в космос ракетами, оснащёнными мощными термохимическими двигателями. Ядерные ракетные двигатели (ЯРД) ещё находятся на стадии развития, но, очевидно, найдут применение на межпланетных аппаратах. Эти двигатели на ядерной энергии начали разрабатываться ещё при С.П. Королёве для полётов на Луну и Марс. Сейчас действуют научные программы по разработке РД, проводятся эксперименты на космических станциях.

Под различные ракетные комплексы созданы ракетные двигатели космического назначения.



Рис.3. Двигательные установки космического назначения

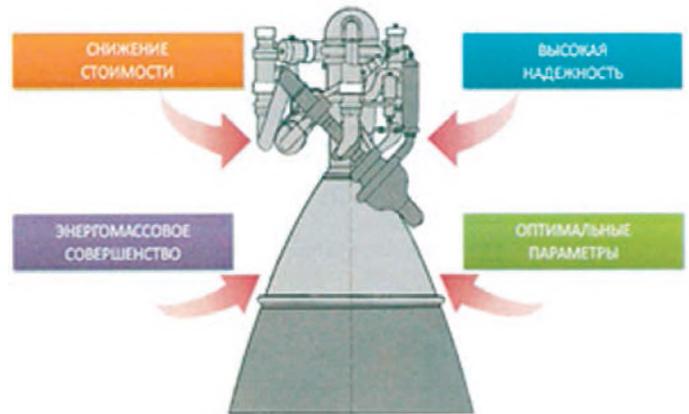


Развитие данного направления продолжается. Яркое тому подтверждение – РН Ангара А5, включая её дальнейшее развитие, которое основывается на одном из лучших ракетных двигателей РД191М. Такие ракеты относятся к среднему классу повышенной грузоподъёмности.

В ближайшем будущем будет развиваться направление по созданию ракеты тяжёлого и сверхтяжёлого класса для полётов на Луну и к дальним планетам.

Развитие двигателестроения включает в себя и модернизацию РД. В настоящее время, учитывая возрастающую массу и стоимость полезной нагрузки, повышается экономическая составляющая и стартовых площадок. Строится первый национальный космодром гражданского назначения, который позволит обеспечить независимый доступ России в космическое пространство и обеспечит запуски ракет сверхтяжёлого класса. Одним из важнейших моментов по повышению и обеспечению надёжности РД является пайка конструкций камер сгорания и газогенераторов. При спаивании конструкций можно выделить ряд основных проблемных вопросов:

1. Точность изготовления и подгонка до пайки.
2. Проблемы теплонапряжённого состояния при пайке.
3. Теплофизические и материаловедческие процессы при пайке:
  - состав припоя;
  - зазоры;
  - изменение наноструктур;
  - определение рельефной структуры (толщина припоя, глубина диффузии);
  - картина распределения элементного состава.
4. Оценка напряжённых состояний материала.
5. Методы неразрушающего контроля.
6. Моделирование напряжений, накапливающихся от испытания к испытанию.
7. Накопление сдвиговых напряжений.



Особо необходимо отметить технологии сварки высоколегированных сталей. Большинство таких сталей склонно к образованию горячих или холодных трещин при сварке, что усложняет процесс обеспечения качества сварных соединений с требуемыми свойствами.

В ЖРД-строении новым направлением является нанесение покрытий с использованием нанотехнологий. Оно позволяет защитить поверхность агрегатов при воздействии высокотемпературных агрессивных окислительных сред, защищает поверхности при каталитическом воздействии продуктов сгорания при восстановительной газогенерации, продлевает ресурс, повышает надёжность, даёт возможность создания многофазового двигателя на различных компонентах топлива и различных схем (с восстановительным и окислительным газогенератором).

При проектировании технологических процессов РД важно учитывать воздействие окислительной среды, на что они воздействуют. В первую очередь воздействие продуктов окислительной газогенерации распространяется на элементы газового тракта (газовод, лопатки турбины и спрямляющего аппарата и др.). Также идёт сильное воздействие на жидкостные тракты (колесо насоса, подшипники), возгорание элементов конструкции в результате дополнительного источника: трение, взаимодействие с частицами, наличие органических инициаторов, самовозгорание.



Рис. 4. Сложная конфигурация поверхности лопаток газовой турбины.



Рис. 5

Ещё один важный фактор, который необходимо учитывать – это воздействие восстановительной среды. На что она будет воздействовать?

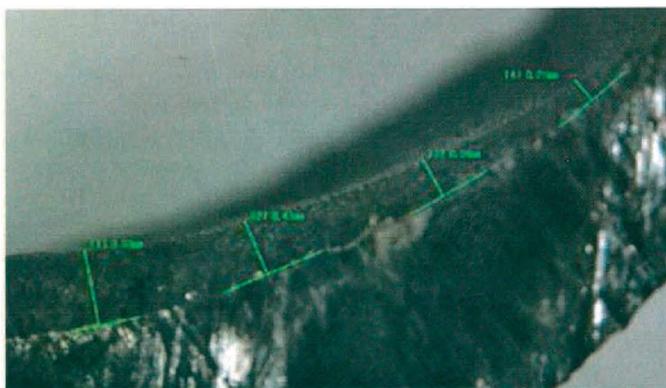
1. На элементы газового тракта (газовод, лопадки турбины и спрямляющего аппарата и др.).

2. Воздействие горючего на жидкостные тракты (тракт охлаждения).

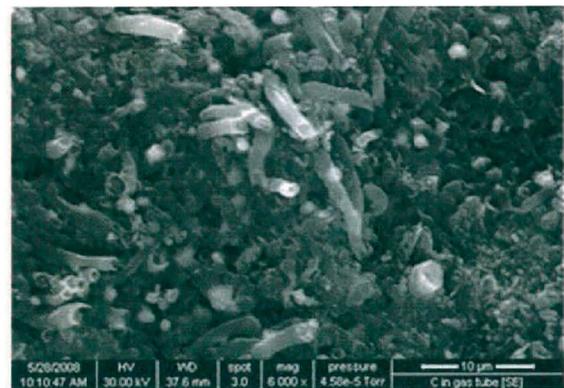
3. На изменение свойств поверхностного слоя материала, выпадение конденсированной фазы в чистом виде (сажа).

**Взаимодействие со средой (межкристаллитная коррозия).**

**Наблюдается только в турбинном подшипнике на-носа окислителя.**



Разрез образца трубопровода с накопившимся слоем углеродных образований.



Поверхность под электронным микроскопом: видна волоконнистая структура.

Рис. 6. Воздействие восстановительной среды на материал газОВОДА

В недалёком прошлом под руководством С.А. Афанасьева шло бурное развитие технологий корпусов РДТТ.

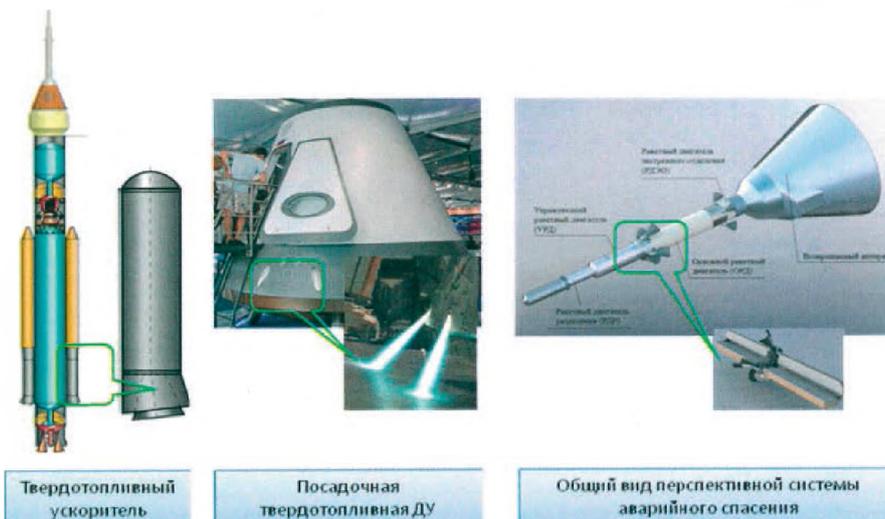
Данному вопросу уделялось огромное внимание. Рассматривались различные материалы. Такие как сталь, стеклопластик, органоластик, углепластик.

Также получили развитие технологии сопловых блоков.

Сегодня РДТТ находят применение и в мирных целях. Твёрдотопливные ускорители применяются на различных типах ракет. Они обеспечивают импульс тяги, необходимый для прохождения через плотные нижние слои земной атмосферы. Посадочные модули необходимы для жизнеобеспечения экипажа космического корабля при возвращении на Землю.



Рис. 7. Технологии сопловых блоков

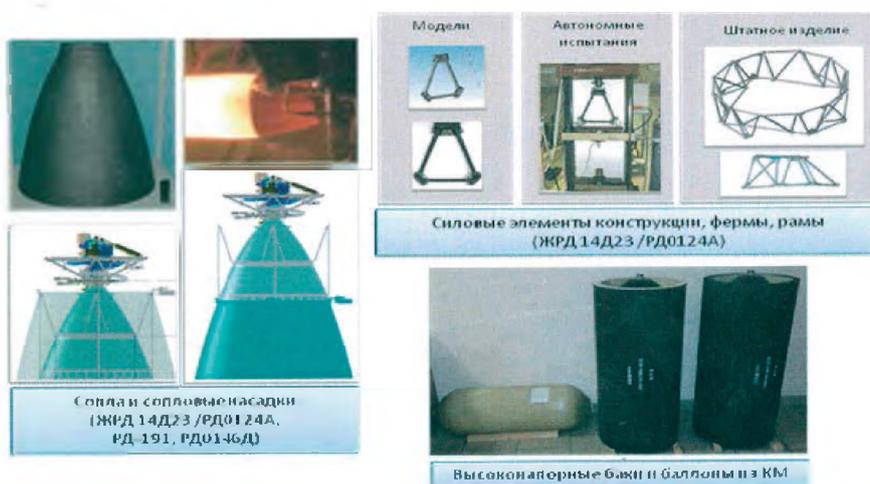


Твердотопливный ускоритель

Посадочная твердотопливная ДУ

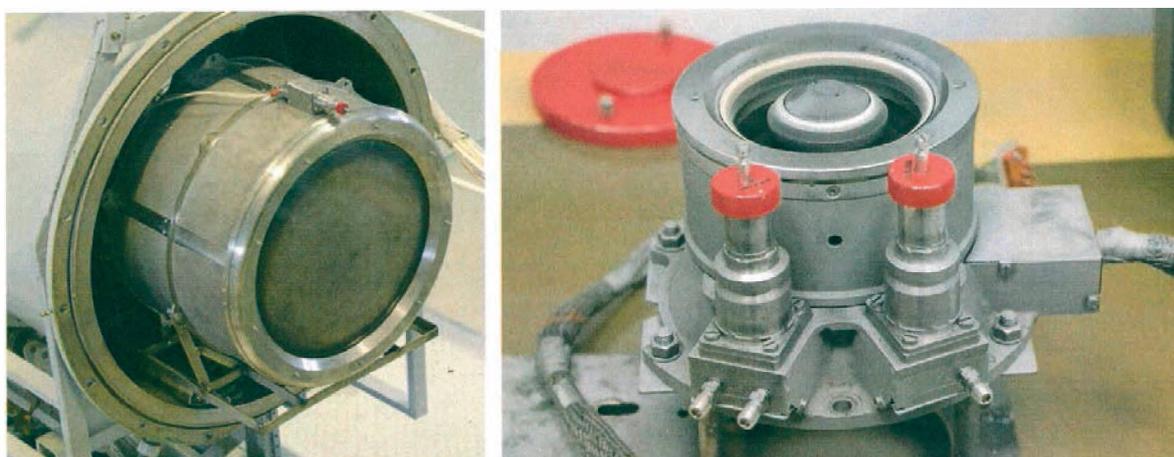
Общий вид перспективной системы аварийного спасения

**Твердотопливные двигатели космического назначения**



**Композиционные материалы**

Одним из важных направлений является развитие электроракетных двигателей. Они характеризуются повышенным удельным импульсом тяги (до 3000 с и более) в целях увеличения доли полезной нагрузки КА и повышением ресурсных характеристик, в том числе за счёт использования новых материалов.



Ионный двигатель (слева), холловский двигатель (справа)

Для производства таких двигателей используются перспективные материалы.



Перспективные материалы в составе ЭРД

В свое время под руководством С.А. Афанасьева в РКК «Энергия» прорабатывались перелёты на Марс. Уже тогда закладывались проекты с использованием ядерных энергетических установок.

В настоящее время идеи С.А. Афанасьева превратились в решение комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и развитию экономики России от 28.10.2009 №5 в проект «Создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса».

## ◆ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И ПАЙКИ

УДК 629.78:621.791:681.3

*Чичков С.А., Кулик В.И.*

### Новое поколение малогабаритных камерных головок закрытого типа для орбитальной сварки стальных трубопроводов диаметрами 14–18 мм в стеснённых монтажных условиях

В статье изложены результаты разработки опытных образцов оборудования для орбитальной сварки пневмогидросистем малых диаметров в атмосфере защитного газа в особо стеснённых монтажных условиях для обеспечения производства космических аппаратов.

**Ключевые слова:** автоматическая аргодуговая сварка, современное сварочное оборудование, орбитальная сварка, камерные сварочные головки закрытого типа, малогабаритные сварочные головки, сварка стальных трубопроводов малого диаметра.

В настоящее время орбитальная сварка в атмосфере защитного газа является самым надёжным способом получения неразъёмных соединений трубопроводов пневмогидросистем различного, в том числе и космического, назначения. Эта технология сочетает в себе проверенный временем физический принцип и автоматизированное управление множеством параметров, влияющих на качество сварного шва, что подразумевает минимальное вмешательство человека в процесс и позволяет добиться минимальной дефектности и максимальной повторяемости качественного результата.

Для производства новых образцов космической техники (например, пилотируемый корабль нового поколения),

предполагающей разветвлённую систему трубопроводов малого диаметра, необходима разработка нового технологического оборудования, которое обеспечивает особо качественную сварку частей пневмогидросистем в условиях ограниченной доступности стыков и плотной компоновки.

Для решения подобной задачи в отделении сварки и пайки ФГУП «НПО «Техномаш» разработан опытный образец малогабаритной сварочной головки камерного типа новой конструкции. На производстве запланирована сварка неповоротных монтажных стыков трубопроводов (МСТ) из стали толщиной стенки 1–2 мм с подкладной втулкой (рис. 1).

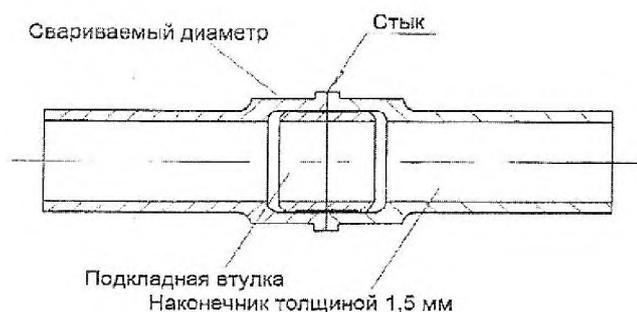


Рис. 1. Образец сварного соединения

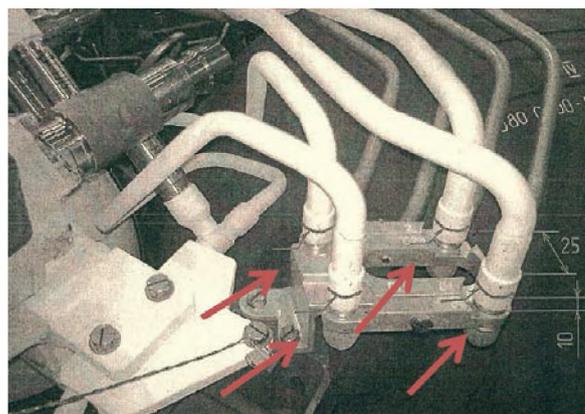


Рис.2. Возможные монтажные условия орбитальной сварки трубопроводов

Возможные монтажные условия приведены на рис. 2. Места стыков обозначены стрелками.

Технические характеристики головки для сварки трубопроводов диаметром 14-18 мм представлены в табл. Общий вид устройства показан на рис. 3.

**Таблица. Технические характеристики опытного образца малогабаритной камерной сварочной головки**

Наружный диаметр свариваемого стыкового соединения, мм	до 18
Установочная база, мм	16
Радиус камеры в зоне стыка, мм	30
Высота камеры в зоне стыка, мм	20
Диаметр вольфрамового электрода, мм	1,0; 1,6
Скорость сварки, м/ч	до 30
Максимальный сварочный ток в импульсе, А	150
Коллекторный токо- и газоподвод	есть
Программное управление	есть
Защитная среда	аргон
Охлаждение	воздушное + аргон
Тип привода вращения	шаговый двигатель
Габариты, мм	143x60x29
Масса, кг	0,5

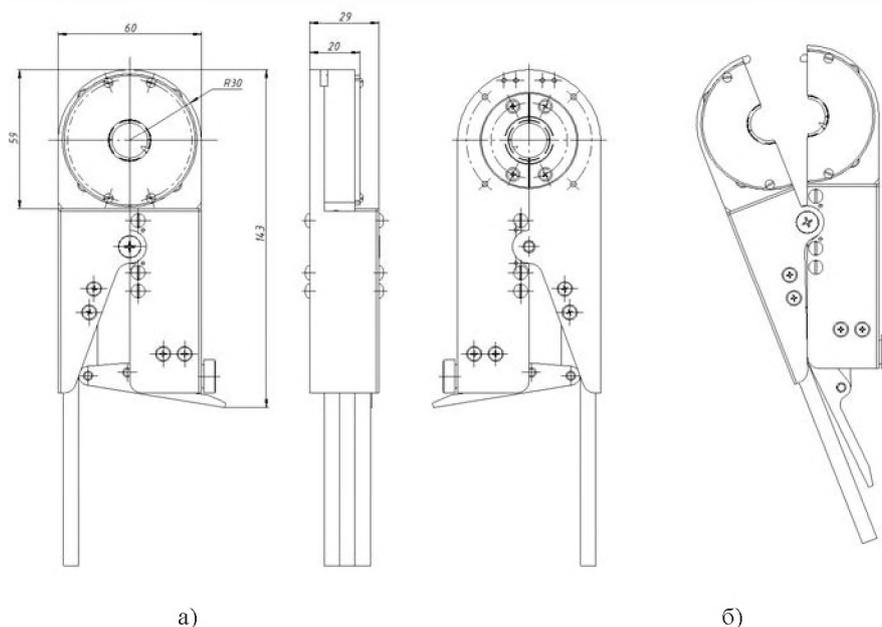


Рис.3. Эскиз малогабаритной камерной сварочной головки с габаритными размерами в открытом (а) и закрытом (б) состоянии

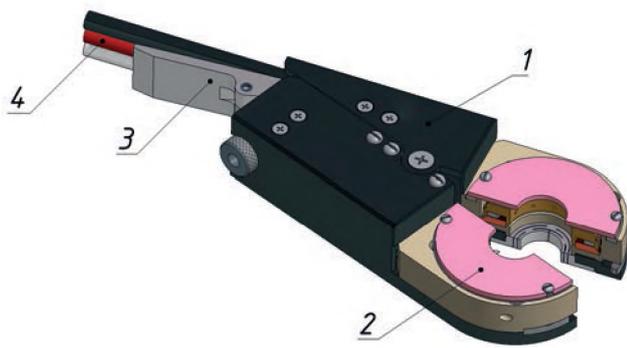


Рис. 4. Модель малогабаритной камерной сварочной головки

Головка состоит из корпуса клещевого типа (1), разъёмной камеры (2), регулируемой рычажной системы зажима (3). К корпусу подведён единый шланг-пакет, соединяющий трубки и кабели (подача защитного газа (аргона), сварочного тока, питание и управление приводом вращения (4)). Габариты сварочной головки минимальны и составляют (для модели, разработанной для сварки трубопроводов диаметром 14-18 мм) 143х60х29 мм, габариты сварочной камеры – 60х59х20 мм (рис. 4). Вес составляет 0,5 кг. Все это делает её одной из самых компактных и легких сварочных головок. За рубежом существует только пара аналогов, сравнимых по массогабаритным характеристикам.

Конструкция головки разработана по принципу «сварочные клещи»: камера и корпус состоят их двух половин, и чтобы установить головку на трубу необходимо надавить на подвижную половинку корпуса и, раскрыв камеру, зафиксировать закрытие рычагом. Это отличается от наиболее распространённой в мире конструкции камерных головок, разработанных по принципу распашной камеры с откидной половиной на шарнире, которая вручную открывается и закрывается подпружиненным замком. Во время сварки детали камеры нагреваются, поэтому вручную открыть ее может быть затруднительно. В рассматриваемой конструкции эта проблема решена.

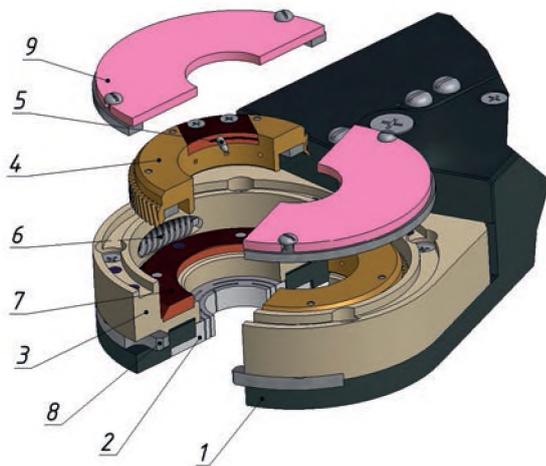


Рис. 5. Конструкция разъёмной сварочной камеры

Разъёмная камера (рис.5) состоит из металлического основания (1); сменного вкладыша для фиксации на трубопроводе (2); разъёмного корпуса камеры, выполненного из изолирующего термопластика (3); разъёмной токопроводящей планшайбы (4); вольфрамового электрода (5); червяка, вращающего планшайбу (6); токогазоподвода (7) – разъёмной детали, которая выполняет роль направляющей вращения планшайбы, газоподвода и токоподвода одновременно; упоров, предотвращающих смещение половин камеры относительно друг друга (8) и съёмных керамических пластин (9), закрывающих камеру сверху.

Как следует из типа данной сварочной головки, она имеет коллекторный токогазоподвод [1]. Сварочная камера сконструирована таким образом, что все необходимые кабели и трубки собираются в единый шланг-пакет и проходят внутри ее корпуса.

Непосредственно в теле вращающейся планшайбы предусмотрена кольцевая камера распределения газа (коллектор), откуда он равномерно поступает во внутреннюю полость камеры через ряд отверстий, расположенных по окружности на внутренней поверхности планшайбы, благодаря чему происходит охлаждение планшайбы при сварке и равномерная защита получаемого шва. Потоки газа из отверстий направлены непосредственно на шов и околошовную зону. В процессе сварки они вращаются вместе с планшайбой, что позволяет газу максимально эффективно заполнить камеру, вытеснив атмосферный воздух.

Ещё одна особенность данной конструкции в том, что для крепления планшайбы к токогазоподводу используются магниты, что позволяет легко извлечь эти детали для обслуживания, осмотра, регулировки или замены. Магниты, запрессованные в токогазоподвод, позволяют добиться постоянного усилия прижатия планшайбы к нему, обеспечивая замкнутость внутреннего коллектора защитного газа и постоянство электрического контакта при вращении, позволяя при необходимости снять саму деталь.

Закрывающие керамические пластины (9) удерживаются на магнитах, запрессованных в неподвижный изолирующий корпус камеры, что препятствует их вращению вместе с планшайбой. При этом через пластины невозможен электрический пробой с планшайбы на окружающие головку металлические поверхности, поэтому головку возможно устанавливать практически вплотную к стенкам и изгибам труб. После установки головки на трубу можно снять керамические пластины, осмотреть зону сварки, проверить совпадение электрода и линии стыка, и при необходимости отрегулировать зазор между электродом и трубопроводом.

Приводной червяк, вращающий планшайбу, располагается внутри стенки корпуса одной из половин камеры таким образом, что не требует нарушения равномерного закругления стенок камеры, и совершенно незаметен снаружи.

Сменные вкладыши, изготавливаемые для конкретного диаметра труб, имеют кольцевые щели, при деформации

ции которых достигается закрепление головки на участке трубы.

Корпус сварочной головки изготовлен из цельной заготовки высокопрочного алюминиевого сплава. Он выполняет роль основания сварочной камеры, рукоятки головки, места подключения шланг-пакета, рычага раскрытия камеры и корпуса привода вращения планшайбы в камере. Внутри левой половины корпуса находится штуцер ввода защитного газа, элемент подключения токоподвода и шланг-пакет. Внутри правой половинки располагается привод вращения, состоящий из миниатюрного шагового двигателя, вращающего приводной червяк через пару шестерён из изолирующего материала, и система регулирования усилия зажима. Применение промежуточной изолирующей шестерни вместе с токопроводящей планшайбой позволило изготовить приводной червяк из традиционной для него высоко-

прочной стали, а не из изолятора, что положительно влияет на его долговечность и требуемую точность изготовления.

Управление процессом сварки осуществляется аппаратурой управления в автоматическом режиме, что позволяет программировать и воспроизводить необходимый режим со стабильным качеством сварного шва.

Поданы патентные заявки на ключевые конструкторские решения.

В настоящее время сварочная головка проходит испытания, планируется рассмотреть возможность ее внедрения на предприятиях отрасли.

#### Список литературы

1. Сварка. Резка. Контроль: Справочник в 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышева. М.: Машиностроение, 2004.

УДК 621.357.7

*Портных А.И., Кулик В.И., Маркин К.Н., Бецеков В.Г., Бочаров Ю.А.*

### Исследование режимов и применяемых материалов при пескоструйной обработке перед нанесением теплозащитных и других покрытий камер сгорания жидкостных ракетных двигателей

Статья посвящена исследованию режимов и применяемых материалов при пескоструйной обработке перед нанесением теплозащитных и других покрытий на камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей. Определена перспектива развития методологии подготовки поверхности деталей под плазменное напыление.

**Ключевые слова:** пескоструйная обработка, камера сгорания, жидкостный ракетный двигатель, абразивный материал.

Физическая активация материала поверхностного слоя деталей перед нанесением на них различного рода покрытий из других материалов является одним из определяющих факторов управления процессом подготовки материала подложки (создание дислокаций, наклёпа, шероховатости поверхности) перед напылением.

Пескоструйная обработка (опескоструивание) относится к способам удаления прочных, химически связанных загрязнений с поверхности подложки путём их механического дробления потоком сжатого воздуха, содержащего кварцевый песок [1]. С помощью такой обработки очищается поверхность от адсорбированных веществ и выводится из состояния термодинамического равновесия со средой путём освобождения межатомных связей поверхностных атомов. Таким образом, опескоструивание активирует поверхность подложки. Активность поверхности быстро падает из-за адсорбции газов из атмосферы и окисления. Поэтому время между очисткой поверхности и нанесением покрытий, как показала практика, должно быть минимальным.

В качестве абразивных материалов используют чугуновую и стальную колотую дробь (для толстостенных деталей), корунд (электрокорунд) – плавленый оксид алюминия, карборунд (карбид кремния), чугунный и стальной

песок. Материалы должны быть сухими и чистыми, чтобы не загрязнять подготавливаемую поверхность.

Сжатый воздух должен быть хорошо очищен от влаги и масла. Давление воздуха – 4–7 атм, дистанция обработки 50–130 мкм, угол встречи 60–90°, расход абразива 300–500 кг/ч.

Воздействие абразива на поверхность определяется наличием острых граней у отдельных частиц, а также длительностью сохранения остроты граней и размера частиц в процессе подготовки.

Современные пескоструйные установки снабжены элеватором и набором сит. После проведения обработки абразив скапливается в нижней части установки, откуда элеватором подается в её верхнюю часть, где производится рассев абразива. Более мелкие частицы удаляются из зоны обработки, т.е. обработка ведётся в условиях постоянного размера абразивных частиц.

Максимальная прочность сцепления получается тогда, когда размеры частиц распыленного металла меньше, чем ширина впадин, возникших на поверхности в результате подготовки. При большей шероховатости не достигается значительного развития поверхности, как это достигается при меньшей, поэтому степень шероховатости должна быть оптимальной.



Качество подготовки поверхности оценивают визуально сравнением с эталонами или определением шероховатости по профилограмме на образце-свидетеле.

После дополнительной абразивно-струйной обработки скорость самодиффузии и диффузии в поверхностном слое значительно выше, чем после электрополирования. В никелевых сплавах после дополнительной пескоструйной обработки скорость самодиффузии никеля при 700°C возросла в 30 раз. Дефекты структуры, возникающие после механической обработки поверхности, весьма устойчивы и влияют на диффузию даже при температуре, превышающей температуру рекристаллизации.

Рассматриваемый эффект зависит от природы металла и типа его кристаллической решётки. В никеле он больше, чем в меди или железе. В меди влияние шлифования ещё сохраняется после нагрева  $0,7 T_{\text{пл}}$ . В железе эффект исчезает, как только начинается рекристаллизация ( $0,45 T_{\text{пл}}$ ). Разница в поведении этих металлов объясняется различной энергией дефектов упаковки в них. Никель и медь – сплавы с низкой энергией дефектов упаковки, и скорость разупрочнения в них мала, плотность дислокаций уменьшается медленно. Поэтому удастся зарегистрировать повышенную скорость диффузии в приповерхностных слоях при достаточно высокой температуре.

Закономерности диффузии в сильно деформированных приповерхностных слоях в полной мере могут быть отнесены к диффузионным процессам в подложке и частицах при напылении. Более того, в момент образования покрытия объёмные процессы будут интенсифицироваться пластической деформацией обоих материалов в контактной зоне.

Наиболее распространенным процессом для подготовки поверхностей под нанесение теплозащитных и других покрытий является их физическая активация абразивным материалом в пескоструйных камерах.

Качество активации поверхности определяет адгезивные и когезивные свойства покрытия, его служебные характеристики.

Факторами, определяющими и влияющими на подготовку поверхности, являются применяемые материалы (песок, дробь и др.), грануляция материалов, рабочее давление, создаваемое установкой для абразива, угол встречи абразива с поверхностью, дистанция до обрабатываемой поверхности.

В зависимости от напыляемых материалов и материала напыляемой поверхности, её геометрии и габаритов, значение этих факторов должно изменяться.

Для определения влияния применяемых материалов и режимов на качество пескоструйной обработки поверхности детали отобрали плоские образцы по 36 штук (девять групп по четыре образца в каждой).

Пескоструйная обработка образцов выполнялась при давлении 4, 5 и 6 атм. и на расстоянии до обрабатываемой поверхности 70, 90 и 110 мм в два прохода материалами:

- карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F-20 (зерновой состав: 1,7–1,18 мм – 20%; 1,18–1,0 мм – 45%; 1–0,85 мм – 25%; менее 0,85 мм – 10%);

- карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F-46 (зерновой состав: 0,6–0,425 мм – 30%; 0,425–0,355 мм – 40%; 0,355–0,3 мм – 25%; менее 0,3 мм – 5%);

Параметры шероховатости образцов после пескоструйной обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F-20 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 70 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина, мкм	16,2-19,8	118-124	250-350	14,4-17,0	90-116	200-310	16,4-17,6	105-116	260-350
Карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F-20 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 90 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина, мкм	16,0-21,0	101-120	240-330	16,8-18,8	99-111	220-290	19,2-21,2	105-123	250-350
Карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F-20 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 110 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm



Величина, мкм	19,0-21,0	116-119	260-350	16,6-18,8	101-109	250-350	18,2-19,8	116-127	260-330
Карбид кремния черный марки 54С зернистостью F-46 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 70 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина, мкм	9,0-13,0	61-59	150-220	9,8-11,0	62-73	140-190	11,6-13,0	79-86	190-230
Карбид кремния черный марки 54С зернистостью F-46 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 90 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина, мкм	9,8-10,8	68-74	150-170	10,0-11,2	64-73	170-190	9,8-10,6	64-75	170-190
Карбид кремния черный марки 54С зернистостью F-46 Расстояние до обрабатываемой поверхности – 110 мм Два прохода									
Давление, атм	4			5			6		
Параметры шероховатости	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm	Ra	Rz	Sm
Величина, мкм	9,0-9,4	60-64	160-190	10,6-11,2	68-67	180-190	10,8-11,6	74-78	180-190

Затем на отпескоструенные образцы нанесли нихромовое покрытие толщиной 120–150 мкм, после чего выполнили определение адгезионной прочности нанесённого покрытия. Результаты адгезионной прочности покрытия представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Давление, атм	4			5			6		
Дистанция до обрабатываемой поверхности, мм	70	90	110	70	90	110	70	90	110
Величина адгезии	Карбид кремния черный марки 54С зернистостью F-20 Два прохода								
	112,2	104,1	102,0	106,1	112,2	87,7	65,3	112,2	89,8
	108,2	85,7	102,0	95,9	114,3	91,8	55,1	100,0	83,7
	108,2	102,0	93,9	100,0	102,0	81,6	61,2	114,3	93,9
Среднее значение	109,5	97,3	99,3	100,7	109,5	87,0	60,5	108,8	89,1
Величина адгезии	Карбид кремния черный марки 54С зернистостью F-46 Два прохода								
	106,1	122,4	130,6	112,2	128,6	136,7	132,6	116,3	126,5
	106,1	142,8	142,8	128,6	136,7	126,5	144,9	122,4	122,4
	108,2	122,4	126,5	136,7	132,6	134,6	142,8	126,5	124,5
Среднее значение	106,8	129,2	133,3	125,8	132,6	132,6	140-1	121,7	124,5

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что уменьшение грануляции адсорбирующего материала приводит к увеличению адгезионной прочности плазмен-

ного покрытия за счёт увеличения суммарной площади отпескоструенной поверхности, а также из-за уменьшения среднего шага неровности поверхности.

Увеличение расстояния до обрабатываемой поверхности отрицательно влияет на адгезионную прочность покрытия.

Стоит отметить, что при подготовке поверхности под плазменное напыление данным способом невозможно полностью удалить остатки абразивного материала с обработанной поверхности и обеспечить равномерную

шероховатость по всей площади обрабатываемой детали, что негативно отразится на адгезионной прочности покрытия.

В связи с этим, перспективным способом подготовки поверхности под плазменное напыление для достижения максимальной адгезионной прочности можно назвать лазерное микроструктурирование.

## ◆ НАНОТЕХНОЛОГИИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 629.78:620.3

*Панов Д.В., Семенов В.В., Тельнов О.В., Егоров А.В.,  
Ахмедов Ф.А., Быков А.А., Кондратенко А.А. (ФГУП «НПО «Техномаш»),  
Ризаханов Р.Н., Агуреев Л.Е. (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»),  
Кенжагулов И.Ю., Степанова К.А. (НЦ «Эталон»)*

### Нанотехнологии в РКП

В данной работе представлены нанотехнологии по созданию новых материалов, деталей конструкций и элементов систем космических аппаратов с улучшенными характеристиками. Рассматриваются технологии по получению лёгких и прочных наноструктурированных материалов, созданию монолитных наноразмерных интегральных схем СВЧ диапазона, а также повышению прочности поверхности оптических элементов путём нанесения углеродных наноструктур.

**Ключевые слова:** наноструктура, нанопорошок, нанокпозиционный материал, алюмокомпозит, алюмомагнетитовая шпинель, гетероструктура, СВЧ-электроника, фосфид индия, интегральная схема, космический аппарат, оптический элемент, карбид кремния, ракетно-космическая техника.

Нанотехнологии – это технологии, использующие уникальные свойства веществ в наномасштабе для создания новых материалов, деталей конструкций, элементов систем и т.д. с улучшенными или требуемыми характеристиками. Вещества с наноразмерами, входящие в состав основного материала, могут изменять его физико-химические свойства в требуемом направлении, открывая новые возможности для решения многих проблем, стоящих перед разработчиками аэрокосмической техники.

Нанотехнологии позволяют изменять следующие свойства материалов:

- **механические:**
  - во многом зависят от размеров и пропорции добавленных наночастиц, от морфологии и силы межфазных взаимодействий наночастиц, что радикально меняет свойства нанокompозита относительно основного материала;
  - молекулярно-совершенные, высокоупорядоченные структуры, например, углеродные нанотрубки, добавленные в композит, могут сильно изменить механическую прочность материала;
- **термические:**
  - теплопроводность можно контролируемо менять размерами добавляемых наночастиц (фононная

связь и квантовые эффекты) и наноразмерными пустотами;

- **электрические:**
  - наноструктура и дефекты влияют на проводимость и энергию запрещённой зоны материала (проводимость, плотность тока);
  - нанодобавки могут улучшать полевую эмиссию и порог перколяции (пробоя) материала;
- **радиационная стойкость:**
  - наноразмерные добавки могут существенно повысить радиационную стойкость материала;
- **оптические:**
  - прозрачность и цвет материала могут меняться в зависимости от доли нано-размерных добавок;
  - величину запрещённой зоны материала-полупроводника можно контролировать размером нано-частиц и наноструктурой материала;
  - на излучательную способность материала влияет размер наночастиц добавки.

Таким образом, используя наноразмерные материалы можно влиять на свойства материалов в требуемом направлении. На рис. 1 показано применение нанотехнологий в разных областях науки и техники.



Рис. 1. Применение нанотехнологий в разных областях науки и техники

Развитие современной ракетной и космической техники сопровождается активным внедрением нанотехнологий для создания узлов и деталей РКТ повышенной прочности, стойкостью к коррозии, радиации и высоким температурам. Одними из широко применяемых материалов в авиакосмической промышленности являются композиционные материалы (КМ), которые создаются с помощью нанотехнологий. КМ, как известно, повышают весовую эффективность несущих конструкций РКТ за счёт своих высоких характеристик прочности, жёсткости, малой плотности и возможности формирования требуемых механических свойств в заданных направлениях [1]. КМ широко используются для изготовления элементов конструкций летательных аппаратов, к которым предъявляются особые требования по условиям жёсткости. К таким конструкциям можно отнести силовые рамы каркасов космических телескопов, солнечных батарей, системы разделения головных обтекателей ракет-носителей. Важнейшим направлением повышения технических и эксплуатационных характеристик многих изделий современной авиакосмической техники является увеличение рабочих температур ответственных теплонагруженных деталей и узлов при сохранении или улучшении конкретных физико-механических, теплофизических и других свойств конструкционных материалов. Наноконпозиционные материалы и нанопокрытия на деталях могут существенно повысить эксплуатационные характеристики многих изделий, в том числе температурный предел работы узлов и механизмов космической техники. Повышение надёжности, экономичности и ресурса узлов

и деталей РКТ постоянно требует усовершенствования существующих, разработки и внедрения новых материалов и технологий. Так, например, для ракетных двигателей необходимо разработать теплозащитные покрытия, обеспечивающие работоспособность при повышенных температурах и нагрузках, стойкие против высокотемпературной коррозии, эрозии и износа [2], [8]. Особенно актуальна эта проблема для деталей камеры сгорания двигателей новых поколений и конверсионных газотурбинных агрегатов с большими ресурсами эксплуатации. Вопросами газотермического, ионно-плазменного вакуумного и электронно-лучевого нанесения нанопокровов на детали занимаются во многих странах, в том числе в США, Англии, Японии, Германии и др. странах, что подтверждает актуальность применения указанных методов в изготовлении теплозащитных слоёв с требуемыми характеристиками. Однако для получения высокотемпературных теплозащитных и износостойких покрытий на сложно-профилированную поверхность изделий необходима разработка специальной технологии нанесения покрытий материалов, например, для создания теплозащитных слоёв используется плазменное нанесение покрытий [3]. Одной из таких технологий может быть разработка технологического процесса нанесения теплозащитных покрытий из наноструктурированных многослойных керамических слоёв с низкой теплопроводностью плазменно-кластерным методом в динамическом вакууме [4]. Увеличение механической прочности при сохранении весовых характеристик материала также является одним из основных направлений исследований в области создания

надёжных конструкций космического назначения. Добавление наночастиц в основной материал и уменьшение среднего размера зерна материала менее 100 нм значительно изменяет механические свойства материала [10]. В области нанокompозитов исследования направлены на улучшение характеристик материала, таких как вес, огне- и радиационная стойкость, прочность, поглощение энергии, электрические и оптические свойства и другие. В США под эгидой NASA разработана программа развития нанотехнологий и создания наноматериалов для аэрокосмической отрасли. Основными её разделами являются: композиционные наноматериалы, элементы бортовой электроники, сенсоры различного назначения и компоненты оборудования космических аппаратов (КА) [5]. В области наноматериалов речь идёт о новых материалах на основе наночастиц и нанотрубок, позволяющих без ущерба для прочности снизить вес КА, увеличить радиационную стойкость и срок службы деталей и узлов КА. Направления исследований в области нанотехнологий в странах ЕС во многом схожи с программой США, хотя структура немного отличается. Европейские исследователи в качестве наиболее важных направлений работ в области нанотехнологий для аэрокосмической отрасли выделяют многоцелевые конструкционные и функциональные материалы, элементы нано-электроники, материалы и изделия для систем энергообеспечения КА (накопители энергии, топливные элементы, солнечные батареи и т.д.).

На рис. 2 даны соотношения между различными направлениями исследований в области космических нанотехнологий для США, стран Европы и стран Азиатско-Тихоокеанского региона. Из рисунка видно, что достаточно серьёзное внимание уделяется фундаментальным исследованиям процессов создания наноструктур и наноустройств, применению углеродных нанотрубок в космических технологиях, а также созданию нанозементов для оптики и фотоники.

В космической технике активно применяются такие композиционные материалы как, угле- и стеклопластики. Например, каркасы солнечных батарей станции «Мир-2», штанги бортового манипулятора для МКС «Буран», механизм раскрытия бленды изделия «Янтарь», обтекатели ракет «Энергия» и «Протон-М» изготовлены из углепластика, а из стеклопластика изготовлены топливно-пусковые контейнеры баллистических ракет: РТ-2 (РС-12), Р-36М (западная классификация SS18 «Сатана»), «Темп 2С» и др. [6]. Высокопрочные корпуса для твёрдотопливных двигателей 3Дб5 и 3Дб6, транспортно-пусковые контейнеры для ракет «Яхонт» изготавливаются из нанокompозитных материалов [7].

В рамках указанной тенденции существенный вклад в улучшение характеристик машин и конструкций вносят полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные непрерывными стеклянными, углеродными, базальтовыми, полимерными и другими волокнами. Наполнение полимеров наноразмерными наполнителями может повысить упруго-прочностные свойства, деформа-



Рис. 2. Соотношения между различными направлениями исследований в области космических нанотехнологий для США, стран Европы и стран Азиатско-Тихоокеанского региона

ционную теплостойкость, стойкость к образованию трещин, стабильность размеров изделий, а также позволяет создавать материалы с требуемыми электрическими, магнитными, оптическими свойствами. В качестве наноразмерных наполнителей ПКМ используют углеродные наноструктуры высшего порядка с переходными формами углерода: фуллерены, фуллериты, астралены (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы), одно- и многослойные нанотрубки, нановолокна, наносажи [9]. На рис. 3. приведены виды фуллерена и нанотрубки, которые чаще всего применяются при изготовлении термопластичных деталей и узлов конструкций.

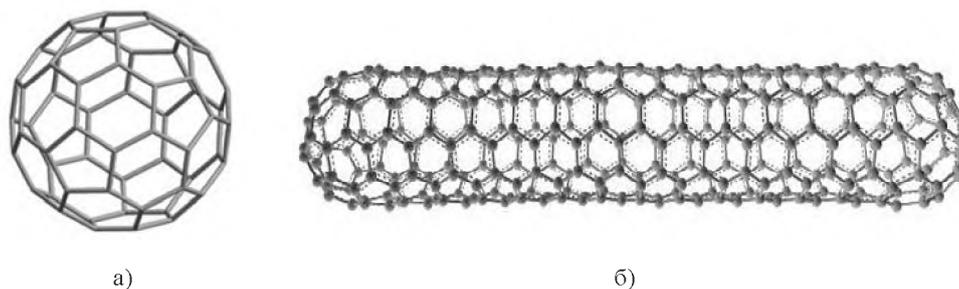


Рис. 3. Виды фуллерена и нанотрубки: а) фуллерен; б) нанотрубка

Определённое ухудшение реологических свойств таких композиций (возрастание вязкости расплава) в полной мере компенсируется резким улучшением эксплуатационных свойств при существенно более низком объёмном содержании в композиции наноразмерного наполнителя. Подобные материалы позволяют не только снизить вес базовых, ответственных конструкций и агрегатов аэрокосмической техники, но и совместно с нанoeлектроникой и микросистемотехникой перейти к принципиально новым конструкциям изделий космического назначения, удовлетворяющих современным требованиям. Увеличение степени интеграции, повышение быстродействия и ужесточение условий эксплуатации устройств РКТ является современной тенденцией развития технологии интегральных микроэлектронных систем. При этом современные многофункциональные микроэлектронные системы создаются на основе применения наноматериалов и нанотехнологий. Эти тенденции являются основой для развития фундаментально нового направления – наносистемной техники – в рамках которого проводятся исследования и разработки нанoeлектронных систем энергоснабжения, терморегулирования и управления элементов целевой аппаратуры КА.

Исследования российских специалистов охватывают и вопросы создания на основе наноструктур принципиально новых конструкционных и функциональных материалов, защитных покрытий, элементов электронных систем КА, источников электроэнергии, сенсоров, высокопроизводительных бортовых компьютеров и интеллектуальных систем на их основе. В рамках Программы Союзного государства Россия–Беларусь «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» во ФГУП «НПО «Техномаш» совместно с ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ЗАО «Станко-Пресс» и НЦ «Эталон» проведены широкие исследования по разработке технологии создания новых материалов для средств космического назначения. В частности, разработаны основы технологий конструкционных наноматериалов для перспективных изделий РКТ, созданы проектные документации, программное обеспечение и лабораторные модели элементов контроля и управления функционированием бортовых систем малых КА, созданных с использованием нанотехнологий. Кратко рассмотрим несколько исследований, проведённых в рамках Программы.

### 1. Разработка технологии создания легких наноструктурных материалов с заданным набором механических и теплофизических свойств для корпусов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД)

Известно, что алюминиевые сплавы и КМ широко используются в РКТ. Для создания высокопрочных алюминиевых сплавов в матрицу можно добавлять наночастицы керамики методом порошковой технологии. При этом механические свойства материала зависят от концентрации нанодобавок и определение максимума прочности открывает новые возможности создания лёгких и прочных конструкций РКТ. Технологическая схема получения образцов композитов на основе алюминия, упрочнённых наночастицами оксидов, представлена на рис. 4.



Рис. 4. Технологическая схема получения образцов композитов на основе алюминия, упрочнённых наночастицами оксидов

Для получения нанодисперсных порошков оксида алюминия и карбида кремния использовалась плазмохимическая установка, которая позволяет получать порошки размерами менее 0,1 мкм. Структуру КМ с нанодобавками изучали на микроскопе FEI Quanta 600 FEG с автоэмиссионным катодом, который интегрирован ком-

плексной системой микроанализа EDAX TRIDENT XM 4, состоящей из энергодисперсионного спектрометра (EDS), спектрометра с волновой дисперсией (WDS) и системы анализа структуры и текстуры кристаллических материалов методом дифракции отраженных электронов (EBSD). Микроскоп позволяет получать изображения различных объектов с увеличением до 1060000 крат (рис.5).



Рис. 5. Микроскоп FEI Quanta 600 FEG

В качестве упрочняющих добавок алюмокомпозитов выбрали  $Al_2O_3$ , синтезированный на плазмохимической установке, а также SiC. Диапазон концентраций в матрице находился в пределах для SiC 0,01-0,15 объёмных процентов и 0,01–1,5 объёмных процентов для оксида алюминия. Температура спекания находилась в пределах 600–640°C в форвакууме.

Основные результаты исследований по данной работе:

- алюмокомпозит, спрессованный при 400 МПа, содержащий 1 объёмный процент  $Al_2O_3$  показал наилучший результат по плотности, равный 2,74 г/см<sup>3</sup>;
- минимальная общая пористость после спекания, равная 3,3%, отмечена у композитов с наночастицами SiC с 0,05 объёмным процентом;
- предел прочности на растяжение алюмокомпозитов, легированных медью и никелем, с добавками наночастиц  $Al_2O_3$ , SiC) в концентрации 0,01-0,15 объёмных процента находится в интервале 129–383 МПа, а предел прочности на изгиб 130–280 МПа;
- микротвёрдость композитов без меди составила 0,3-0,35 ГПа, а с медью – 0,52–0,58 ГПа.

## 2. Разработка технологии получения высококачественных наноразмерных порошков из керамического материала, в том числе из алюмомагниевого шпинели

На данный момент существуют различные виды прозрачных керамик на основе как простых, так и сложных оксидов. Среди них особое место занимает алюмомагниевого шпинель ( $MgAl_2O_4$ ), которая благодаря высокой температуре плавления, твёрдости, химической стойкости

и прочности, сохраняющихся при высоких температурах, является эффективным материалом для высокотемпературной техники. Сочетание уникальных оптических и механических свойств делает шпинель одной из самых выдающихся оптически прозрачных керамик. Шпинель обладает лучшим пропусканием излучения по сравнению с сапфиром в диапазоне длин волн 4,5-5,5 мкм, то есть в области, которая имеет особое значение для поисковых систем и систем электрооптической визуализации. Прозрачная шпинель может быть получена с использованием горячего прессования, а также используя метод искрового плазменного спекания [11]. Как правило, керамику из алюмомагниевого шпинели получают в три стадии: синтез порошка шпинели, формование полуфабрикатов, спекание в среде водорода или вакууме. Свойства оптически прозрачных керамических изделий сильно зависят от состава, структуры и дисперсности порошкообразных прекурсоров. Для получения высококачественных наноразмерных порошков использовалась золь-гель технология синтеза порошков, дающая возможность максимально гомогенизировать исследуемые составы на молекулярном уровне и получать высокодисперсный (с размером частиц <0,1 мкм) материал. Методом РЭМ (рентгеновский электронный микроскоп) проведен качественный и количественный элементный анализ порошков шпинели, полученных после синтеза с различной скоростью нагрева и длительностью выдержки. Сканирование поверхности проведено в нескольких точках пробы, что показало равномерное распределение примеси по поверхности порошка. Как ожидалось, меньшие времена выдержки при высоких температурах способствуют формированию шпинели состава, близкого к стехиометрическому. Установлено, что скорость нагрева в температурном интервале образования шпинели должна быть выше 2°C/мин, время выдержки – не более 3 ч. Стехиометрию и размеры области когерентного рассеивания синтезируемой шпинели можно определить с использованием метода РФА. На рис. 6 представлены дифрактограммы образца с содержанием  $MgAl_2O_4$  99,5 %.

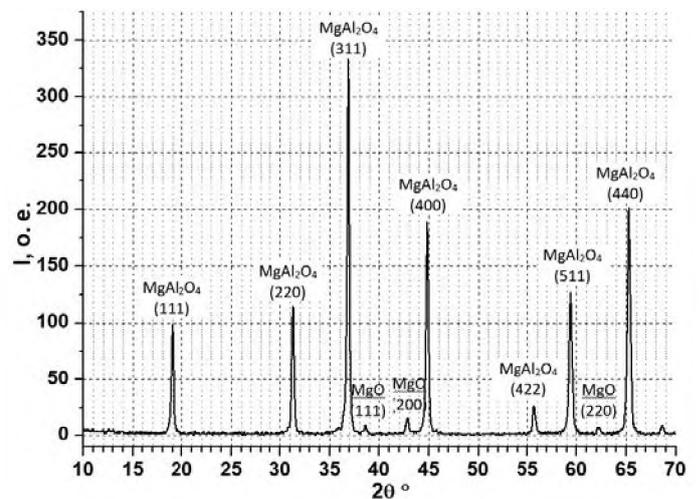


Рис. 6. Дифрактограмма образца с содержанием  $MgAl_2O_4$



Определение распределения частиц по размерам и наличия агломератов проведено методом лазерной дифракции с использованием лазерного гранулометра Microtrac Bluewave. На рис. 7 представлены распределение частиц и наличие агломератов, где средний размер частиц равен 4 мкм.

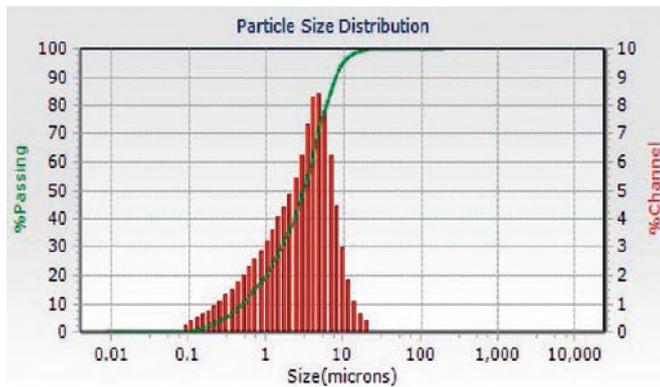


Рис. 7. Распределение частиц и наличие агломератов

Основные результаты исследований по данной работе:

- разработана технология синтеза особо чистых нанопорошков алюмомагнетитовой шпинели;
- установлено влияние параметров процесса синтеза на стехиометрическое соотношение, количество и распределение примесей в конечном продукте;
- определено, что стехиометрия шпинели зависит от скорости нагрева в температурном интервале образования шпинели и времени выдержки;
- установлено, что для синтеза шпинели, близкой к стехиометрической, оптимальным параметром является скорость нагрева в температурном интервале образования шпинели не выше 2°С/мин и временем выдержки 3 ч.

### 3. Разработка технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (до 60 ГГц) на подложках фосфида индия (InP) мощностью до 1 Вт с 1 мм затвора

В настоящее время бурное развитие твердотельной СВЧ-электроники связано с освоением новых материалов и приборов с наноразмерами. На сегодня производство СВЧ-электроники, в основном, связано с технологиями на основе кремния и арсенид галлия. На фоне этих доминирующих сегодня технологий развиваются направления, которые, возможно, будут играть важнейшую роль в СВЧ-электронике завтра. Прежде всего, речь идет о фосфида индия и твердых растворах на его основе. Базовыми элементами для реализации монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-миллиметрового диапазона в настоящее время являются гетероструктурные полевые транзисторы в системе материалов AlInAs/InGaAs, выращиваемые на подложках InP, которые существенно превосходят хорошо освоенные в производстве AlGaAs/

InGaAs HEMT (High Electron Mobility Transistor) транзисторы по максимальным рабочим частотам и минимальному уровню шумов. В настоящее время СВЧ-МИС на основе AlInAs/InGaAs/InP HEMT-транзисторов уже достаточно широко производятся и применяются за рубежом, прежде всего в США, Японии и Франции. В частности, о создании HEMT с InGaAs/InAlAs/InP-структурой на 100-мм пластинах по 0,1-мкм технологии одной из первых объявила компания Northrop Grumman Space Technology (США). Транзисторы показали граничную частоту более 190 ГГц при плотности тока 540 мА/мм. В последние годы за рубежом наблюдается быстрое развитие разработок и производства МИС миллиметрового диапазона для обеспечения развития телекоммуникационных технологий, систем радиолокации высокого разрешения, спутниковой связи и др. Из открытых источников известно, что HEMT-транзисторы на основе InP являются наиболее подходящим для рабочих частот вблизи 60 ГГц. В области более низких частот максимальная плотность выходной мощности таких приборов достигает 1 Вт/мм, однако в области 60 ГГц характерная максимальная плотность выходной мощности HEMT-транзисторов на основе InP находится в диапазоне 0.4-0.5 Вт/мм. Монолитные интегральные схемы и устройства на основе фосфида индия (InP) представляют собой весьма перспективное решение для модулей систем связи, где требуется малые уровни шума. Устройства, выполненные на подложках этого типа, демонстрируют отличные характеристики и идеально подходят для телекоммуникационных приложений. Например, HEMT-транзисторы на основе InP имеют низкий коэффициент шума, высокую выходную мощность, малое рабочее напряжение, высокий КПД и очень высокое быстродействие. Дрейфовая скорость носителей заряда у фосфида индия в 1,5 раза больше, чем у арсенида галлия. Для полевых СВЧ-транзисторов в системе материалов AlInAs/InGaAs/InP двумерный электронный газ обычно создается в квантовой яме  $In_xGa_{1-x}As$  с барьерами  $Al_{1-y}In_yAs$ . Постоянные решетки твердых растворов  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  и  $In_{0,52}Al_{0,48}As$  совпадают с постоянной решетки подложки фосфида индия. Поэтому, для изготовления эпитаксиальной гетероструктуры на подложке фосфида индия, необходимо в качестве барьерных слоев использовать тройной раствор  $In_{0,52}Al_{0,48}As$ . Для улучшения транспортных свойств (подвижности) и концентрации носителей заряда в канале, а также лучшему ограничению электронов необходимо увеличение мольной доли In в канале. Однако возможности по увеличению содержания In в канале для структур на подложках фосфида индия ограничены формированием дислокаций несоответствия из-за существенного различия постоянных решетки InP и InAs. Схематичное изображение HEMT-транзисторной гетероструктуры AlInAs/InGaAs/InP представлено на рис. 8.

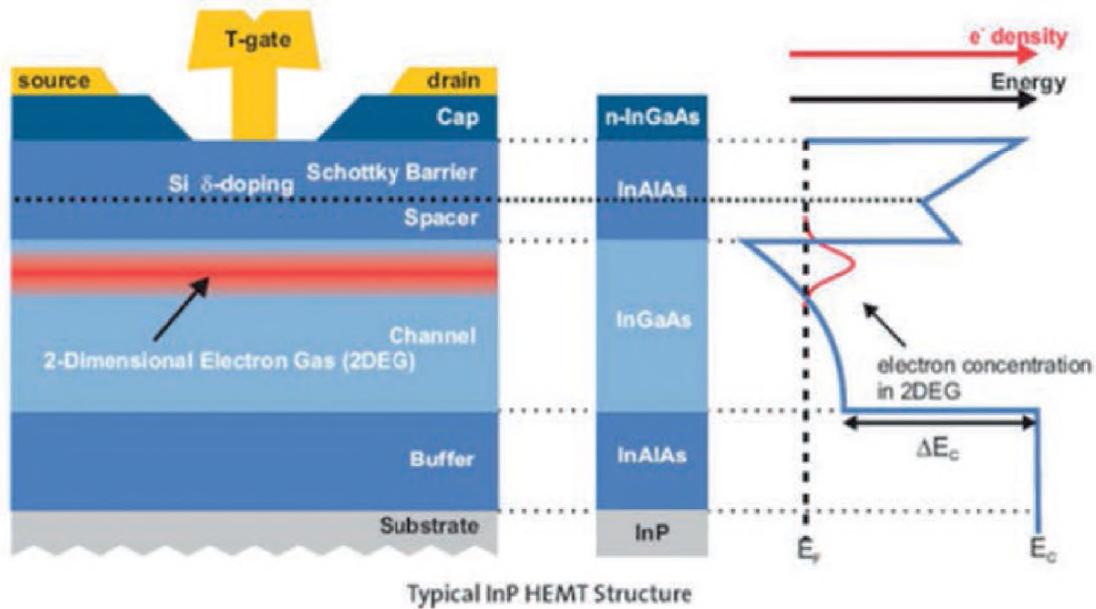


Рис. 8. Схематичное изображение НЕМТ-транзисторной гетероструктуры AlInAs/InGaAs/InP

Состав типичной транзисторной гетероструктуры AlInAs/InGaAs/InP:

- полуизолирующая подложка InP (обычно с кристаллографической ориентацией (100));
- буферный слой InP и/или AlInAs;
- InGaAs канал, решеточно-согласованный с InP;
- спейсерный слой, который отделяет электроны от положительно заряженных носителей, тем самым уменьшая рассеяние на примеси и увеличивая подвижность электронов в канале;
- высоколегированный AlInAs слой или  $\delta$ -легированный слой Si. Высоколегированный слой расположен между барьером Шоттки и спейсерным слоем. Служит донором носителей заряда, обеспечивает доставку электронов в канал. Из-за того, что электроны стремятся занять самые низкие энергетические уровни, они падают в потенциальную яму, где образуют двумерный электронный газ;
- барьер Шоттки, который в отличие от омических контактов стока и истока, создает так называемый контакт Шоттки между металлическим затвором и полупроводниковым материалом с выпрямляющей характеристикой. Это препятствует протеканию высоких токов через затвор и ограничивает туннелирование в канал;
- сильно p-легированный InGaAs контактный слой, который позволяет снизить контактное сопротивление стока и истока, защищает от окисления чувствительный слой InAlAs.

Структуры монокристаллических интегральных схем СВЧ-диапазона на подложках фосфида индия выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Основным достоинством метода МПЭ является возможность выращивания многослойных гетероструктур полупроводниковых соединений с чрезвычайно резкими профилями элементного состава и легирования. МПЭ

представляет собой процесс эпитаксиального выращивания полупроводниковых кристаллов посредством взаимодействия нескольких молекулярных (атомарных) пучков на поверхности нагретой монокристаллической подложки. Для обеспечения режима молекулярного пучка процесс осуществляется в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-7} \div 10^{-9}$  Па). Внешний вид и конструкция установки молекулярно-пучковой эпитаксии RIBER MBE 49 показан на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид и конструкция установки молекулярно-пучковой эпитаксии RIBER MBE 49

Для получения высокой подвижности электронов в канале транзисторной гетероструктуры прежде всего необходимо контролировать химический состав буферного слоя InAlAs. Так как буферные слои достаточно толстые, то параметр постоянной кристаллической решетки буферного слоя должен совпадать с параметром посто-



янной решётки подложки InP. Если параметры решёток будут отличаться, то это приведет к появлению напряжения в структуре и возникновению дефектов, что отрицательно скажется на подвижности электронов двумерного газа в канале транзисторной гетероструктуры. На рис. 10 показана экспериментальная кривая качания образца со слоем InAlAs на поверхности InP, полученная методом рентгеновской дифракции. Угловое положение пика от тестового слоя практически совпадает с угловым положением пика подложки, что указывает на то, что постоянная решётки данного состава тройного соединения тестового слоя InAlAs близка к значению постоянной решётки фосфида индия.

В процессе выполнения исследований была предложена базовая конструкция гетероструктур рНЕМТ на подложке InP, которая обеспечивает гарантированное достижение и превышение значений параметров определенной поставленной задачей. Основные параметры гетероструктуры, приведены в табл.

Таблица.

Параметр	Значение
Диаметр подложки фосфида индия, мм	не менее 76,2
Эффективная мольная доля In в проводящем канале, отн. ед.	0,6 – 0,8
Концентрация носителей заряда в двумерном канале (300 К), см <sup>-2</sup>	$(4,0-5,0) \cdot 10^{12}$
Концентрация носителей заряда в канале InGaAs (300 К), см <sup>-3</sup>	$(4,0-5,0) \cdot 10^{12}$
Подвижность носителей заряда в двумерном канале (300К), см <sup>2</sup> /(В·с)	9000-1000
Плотность поверхностных дефектов, см <sup>-2</sup>	200 - 300

Дальнейшая оптимизация гетероструктуры состоит в изменении состава и толщин слоя канала. Для увеличения подвижности в канале необходимо повышать мольную долю индия в слое InGaAs. Толщина квантовой ямы подбирается таким образом, чтобы она не превышала критическую. Для достижения заданной концентрации в канале транзисторной гетероструктуры при значениях, превосходящих величину  $4,0 \cdot 10^{12}$ , возможно использование двустороннего легирования InGaAs канала.

По спектрам фотолюминесценции можно определить энергию запрещенной зоны полупроводниковых соединений и кванторазмерных объектов, из которых состоит исследуемая структура. Состав эпитаксиального слоя однозначно определяет энергию запрещенной зоны объемного слоя, а энергия запрещенной зоны квантово-размерного объекта зависит от его состава и толщины. Эта взаимосвязь между оптическими и структурными свойствами позволяет оценить состав гетероэпитаксиальных структур.

На рис. 11 представлен спектр фотолюминесценции, имеющий максимум при длине волны 920,7 нм, который соответствует излучению от буферного слоя In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As.

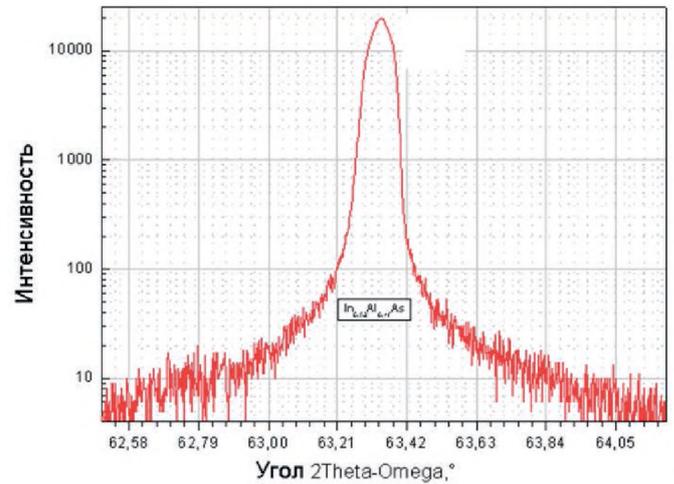


Рис. 10. Экспериментальная кривая качания образца со слоем InAlAs на поверхности InP

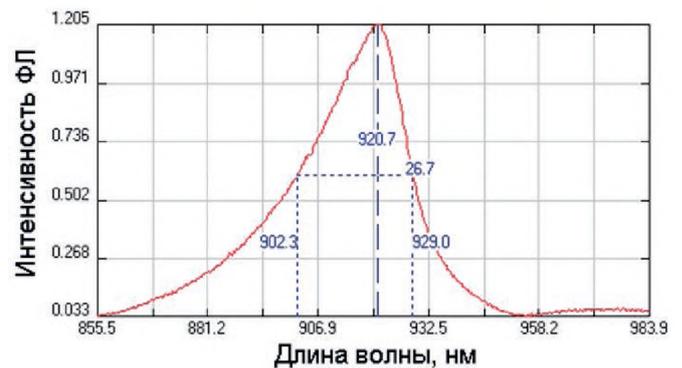


Рис. 11. Спектр фотолюминесценции, имеющий максимум при длине волны 920,7 нм

Основные результаты исследований по данной работе:

- разработаны основы технологии создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (до 60 ГГц) на подложках фосфида индия (InP) мощностью до 1 Вт с 1 мм затвора;
- разработан технологический маршрут создания гетероструктур монолитных интегральных схем СВЧ-диа-



пазона на подложках фосфида индия методом молекулярно-пучковой эпитаксии;

- определены основные требования к гетероструктурам монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона (до 60 ГГц) на подложках фосфида индия и установлены их численные значения.

#### 4. Разработка технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур

В процессе эксплуатации КА, а следовательно, и оптические элементы подвергаются воздействию обширного комплекса различных факторов: при выведении на орбиту – вибрации, ударным и линейным перегрузкам, аэродинамическому нагреву, акустическому шуму; во время орбитального полета – космическому вакууму, высоким и низким (вплоть до криогенных) температурам, электромагнитному излучению (от теплового до жёсткого рентгеновского), корпускулярным потокам, микрометеоритам и другим факторам космического пространства. Целью данной работы является разработка технологии изготовления и конструкции зеркала с упрочняющей наноструктурой, позволяющей сохранить высокую разрешающую способность оптической системы.

При производстве подложек зеркал телескопов и активных сред мощных лазерных излучателей, являющихся полупрозрачными, предъявляются высокие требования к их качеству. Особое внимание к качеству поверхностей оптических элементов мощных лазеров уделяется потому, что наличие поверхностных и объёмных неоднородностей может приводить к изменению расходимости и модуляции излучения. И, как следствие, к потерям выходной энергии или повреждению оптических элементов вплоть до полного разрушения дорогостоящего прибора. Среди материалов для изготовления оптических элементов наиболее перспективным является монокристаллический карбид кремния (SiC). Это обусловлено рядом его уникальных свойств. Поликристаллический карбид кремния – соединение с преимущественно ковалентным типом связи. Такой тип связи отличается наибольшей прочностью, что и обуславливает высокую химическую устойчивость, термическую стойкость и теплопроводность карбида кремния. Сравнительные оценки показали, что для создания крупногабаритных зеркал карбид кремния имеет неоспоримое преимущество перед традиционными материалами (алюминий, титан, ситал, бериллий, медь и др.). Поликристаллический SiC признан в мире как высокоперспективный материал для разработки зеркальных подложек и всех конструктивных элементов телескопов. Сочетание очень низкого коэффициента теплового расширения, сравнимого с инваром с очень высокой теплопроводностью, сравнимой с бериллием, даёт возможность конструировать сборки, выполненные только из SiC, которые почти не чувствительны к вариациям температуры и температурному градиенту. Карбид кремния отличается от других материалов еще высокой твёрдостью. Однако современные требования к оптическим подложкам ставят задачи ещё большего упрочнения системы, равно как

и упрочнение карбида кремния, из которого изготавливаются подложки оптической системы. Одним из методов упрочнения SiC является нанесение эпитаксиального графена на поверхность монокристалла. Известно, что при переходе от роста графена в вакууме к росту в атмосфере аргона изменяются основные технологические условия роста. Это обусловлено тем, что аргон частично подавляет сублимацию компонентов кремния с поверхности подложки карбида кремния, поэтому для образования монослоя графена требуются более высокие температуры роста. Для получения качественных графеновых монослоев необходимо найти оптимальный баланс между температурой роста, давлением аргона и временем роста. В ходе проведения пробных процессов по росту графена в атмосфере аргона получено несколько образцов с разным структурным совершенством. Для характеристики полученного графена применялись современные методики исследования микро- и нанообъектов: атомно-силовая микроскопия (АСМ) и микроРамановская спектроскопия. По результатам измерений, произведённых на всех образцах, определено, что наиболее качественные графеновые плёнки получаются при высоких температурах (1800°C) и высоком давлении аргона в камере (600 торр). В отличие от роста на С-границы графеновая плёнка на Si-границы имела гораздо более однородную структуру, что подтверждается с помощью рамановских спектров, снятых в разных областях образца. На рис. 12 представлены спектры КРС (комбинационное рассеяние света) образца, выращенного на подложке SiC. В спектре видны широкие полосы, соответствующие рамановским процессам второго порядка на подложке SiC, а также линии G и 2D, возникающие при рассеянии света на графене.

Линия G в рамановском спектре соответствует рассеянию света в G-точке зоны Бриллюэна на оптическом фоне, а спектральная линия 2D обусловлена резонансным рассеянием света с участием двух фононов с одинаковой энергией, но противоположным направлением импульса. Однофононная G-линия в рамановском спектре графена возникает комбинационным рассеянием света первого порядка и её интенсивность должна коррелировать с толщиной графенового слоя. При этом областям с большим числом монослоев соответствует большая интенсивность сигнала G-линии. Распределения интенсивности G-линии позволяет обнаруживать относительные перепады между областями с различной толщиной, но не даёт информации о точном количестве монослоев в графене. Для графеновой плёнки с пятью монослоями интенсивность G-линии не должна превышать интенсивность спектра SiC.

Так эпитаксиально выращенные слои графена, образуя сильную связь с поверхностью, упрочняют поверхность карбида кремния, что создаёт большие возможности создания прочных больших оптических зеркал на основе карбида кремния.

Основные результаты по данной работе:

- разработаны основы технологии повышения прочности поверхности оптических элементов посредством нанесения углеродных наноструктур;

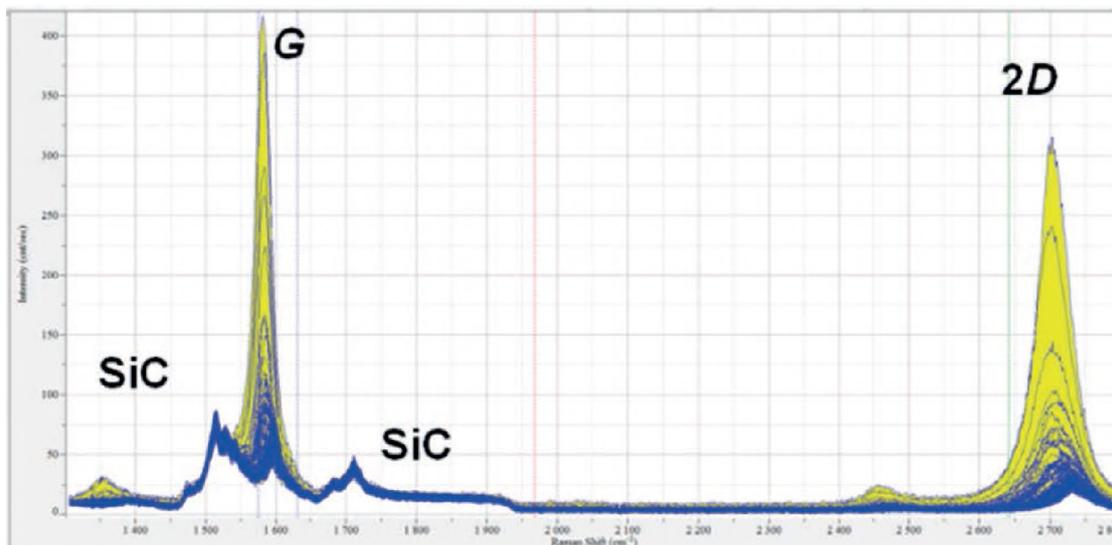


Рис. 12. Спектры комбинационного рассеяния света образца, выращенного на подложке SiC

- создан образец зеркала с упрочняющей наноструктурой, позволяющей сохранить неискажённую поверхность главного входного зеркала оптической системы с предельными отклонениями формы поверхности не более  $0,016 \pm 0,01$  мкм и допустимой шероховатости поверхности  $5 \div 10$  ангстрем в условиях воздействия факторов космического пространства в течение 7–10 лет;
- показано, что для создания крупногабаритных зеркал карбид кремния имеет неоспоримое преимущество перед традиционными материалами.

Таким образом, на основе проведённых исследований можно констатировать, что на современном этапе развития РКТ имеется тенденция перехода от традиционных КМ к нанокomпозиционным материалам. Причём, тенденция к увеличению спроса на «лёгкие», «прочные», «высокотемпературные» и «стойкие к радиации» материалы. Подводя итоги рассмотренных исследований, можно сказать, что разработка комплексных технологий создания материалов с использованием нанотехнологий является сверхактуальной задачей для успешного развития РКТ и во ФГУП «НПО «Техномаш» будут продолжены исследования в указанных выше направлениях.

#### Список литературы

1. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures *Composite Structures*, Volume 92, Issue 12, November 2010, Pages 2793-2810.
2. Keyvani A. Microstructural stability oxidation and hot corrosion resistance of nanostructured  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$  composite compared to conventional YSZ TBC coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015; 623: 229-237.
3. Liu Z-G, Zhang W-H, Ouyang J-H, Zhou Y. Novel double-ceramic-layer  $(\text{La}_{0.8}\text{Eu}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  thermal barrier coatings deposited by plasma spraying. *Ceramics International*. 2014; 40: 11277-11282.
4. Иванов А.В., Полянский М.Н., Ребров С.Г. Плазменно-кластерное нанесение тугоплавких покрытий. *Физика*. Томский университет. №8, 2006.
5. Phil E., Costas S. *Polymer composites in the aerospace industry*. – Sawston: Woodhead Publishing. – 2014. – 536 P.
6. ОАО «Авангард». Опыт производства крупногабаритных изделий из композиционных материалов для ракетно-космической отрасли. // Режим доступа: <http://www.avangard-plastik.ru>. – 27.05.2011.
7. Коваленко В.А., Кондратьев А.В. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности. // *Авиационно-космическая техника*. 2011. №5 (82). С. 14–20.
8. Ghosh S. Microstructure and mechanical properties of a glass-ceramic bond coated TBC system. *Procedia Materials Science*. 2014. 6: 425–429.
9. Латыпов З.З., Галль Л.Н. Фуллерены и углеродные нанокластеры. *Научное приборостроение*. 2005. Том 15. №2. С. 82–87.
10. A.M. Vollebregt. *Nanotechnology in aerospace applications. Current research at NLR, National Aerospace Laboratory NLR*, 2014.
11. Sepulveda JL, Loutfy RO, Chang SY, Ibrahim S. High performance spinel ceramics for IR windows and domes // In: Tustison RW (ed) *Window and dome technologies and materials*. 2011. V. 12.

## ◆ ОБРАЗОВАНИЕ И ОПЕРЕЖАЮЩАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ

УДК: 629.7.658.3

*Муртазин Д.А., Бецеков В.Г.*

### Стратегия развития аспирантуры и докторантуры во ФГУП «НПО «Техномаш»

Статья посвящена анализу процесса подготовки аспирантов в заочной аспирантуре ФГУП «НПО «Техномаш» за период с 2011 по 2018 гг., а также перспективе организации докторантуры на предприятии.

**Ключевые слова:** аспирант, докторант, научный руководитель, научный консультант.

Во ФГУП «НПО «Техномаш» действуют заочная отраслевая аспирантура (организована в 1958 г.) и совет по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, создана заочная отраслевая докторантура (приказ ФГУП «НПО «Техномаш» от 07.03.2017 №53).

Подготовка аспирантов и докторантов предусмотрена по специальностям 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» и 05.07.07 «Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем», входящим в направление подготовки 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника».

В течение пяти лет (2013–2017) в аспирантуру было зачислено семь человек и отчислено 19 (увольнились с Предприятия – 6, завершили обучение – 13).

В апреле 2015 года защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук С.А. Кочергин, начальник отдела технологии сварки высокотемпературными источниками энергии отделения технологии сварки и пайки.

Защитили диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук: главный научный сотрудник отделения технологии сварки и пайки В.Г. Бецеков (март 2011 г.); генеральный директор ПАО «ПЗ «Маш» (г. Пермь) В.И. Ломаев (июнь 2013 г.).

В настоящее время начальник отдела центра конструкторских разработок М.И. Долгополов (научный руководитель – докт. техн. наук, доцент В.Г. Бецеков), завершив обучение в аспирантуре Предприятия, подготовил диссертацию, внедрил её результаты в виде конструкции трубогибочного станка «СГИН-120», предназначенного для «ВМЗ», и выходит на защиту диссертации в 2018 году. Инженер-конструктор 1 категории центра конструкторских разработок, аспирант Н.А. Павлов (научный руководитель – докт. техн. наук, доцент В.Г. Бецеков) также завершил обучение, работает над диссертацией и планирует защиту диссертации в 2019 году.

Ежегодно в июне месяце проводятся вступительные экзамены в заочную аспирантуру ФГУП «НПО «Техномаш».

В 2017 году в аспирантуру поступили четыре работника Предприятия:

– начальник отдела разработки сварочного оборудования и технологий дуговых способов сварки В.Ю. Илюшкин (научный руководитель – канд. техн. наук, начальник отделения технологии сварки и пайки В.И. Кулик);



Рис. 1. Научный руководитель, докт. техн. наук В.Г. Бецеков консультирует аспирантов М.И. Долгополова и Н.А. Павлова

– инженер-технолог 2 категории отделения технологии сварки и пайки Р.В. Машко (научный руководитель – канд. техн. наук, начальник отделения технологии сварки и пайки В.И. Кулик);

– инженер-технолог 1 категории отделения технологии испытаний и неразрушающих методов контроля К.С. Дядьков (научный руководитель – канд. техн. наук, начальник НИЦ Э.В. Венгерский);

– инженер-технолог 2 категории отделения технологии испытаний и неразрушающих методов контроля А.Ю. Перевозников (научный руководитель – канд. техн. наук, начальник лаборатории отделения технологии испытаний и неразрушающих методов контроля А.А. Савельев).



Рис. 2. Научный руководитель, канд. техн. наук В.И. Кулик консультирует аспирантов В.Ю. Илюшкина и Р.Р. Машко

В докторантуру ФГУП «НПО «Техномаш» подали документы два работника Предприятия:

– канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра конструкторских разработок Е.В. Матвеев (научный консультант – докт. техн. наук, доцент В.Г. Бещеков);

– канд. техн. наук, заместитель директора – начальник отделения центра сводного планирования О.В. Гапоненко (научный консультант – докт. техн. наук, профессор Г.Г. Райкунов).

Приказом ФГУП «НПО «Техномаш» от 08.02.2013 №18 установлены размеры разовых вознаграждений работникам Предприятия за успешную защиту:

- кандидатской диссертации:
  - аспиранту (соискателю) ФГУП «НПО «Техномаш» – 90 тыс. рублей;
  - научному руководителю (консультанту) – 70 тыс. рублей;
- докторской диссертации:
  - соискателю – 130 тыс. рублей;
  - научному консультанту – 100 тыс. рублей.

Результаты научных исследований работников нашего предприятия периодически публикуют научно-технические издания: «Технология машиностроения», «Кузнечно-штамповочное производство», «Сварочное производство» и другие.

УДК 629.7:005.963.1

*Тарасов В.А., Штукатуров М.К. (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
Ковков Д.В. (ФГУП «НПО «Техномаш»)*

### **«Русский метод обучения», или Технологии в промышленности и образовании на примере взаимодействия ФГУП «НПО «Техномаш» и МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана**

Статья посвящена новой методологии подготовки кадров для предприятий Госкорпорации «Роскосмос».

**Ключевые слова:** научные общества, аспирантура, докторантура, бакалавриат.

Как и всякий исторический процесс, развитие науки, техники и образования протекает во времени. Российская Академия наук была учреждена в 1724 г. в Санкт-Петербурге по распоряжению императора Петра I, Указом правительствующего Сената от 28 января (8 февраля) 1724 г. По мнению Петра I, при создании академии следовало учитывать опыт западноевропейских академий, но специфической особенностью Российской Академии должна стать поддержка государства. Это стало благодатной почвой для рождения русской инженерной школы [1], в выпускниках которой в середине XIX века остро нуждалась бурно развивавшаяся Российская промышленность, и которые могли бы заменить приглашённых специалистов из-за границы.

«Русский метод обучения» родился во второй половине XIX века в Императорском Московском техническом училище (ИМТУ) и был отмечен наградами на Всероссийской мануфактурной выставке в Санкт-Петербурге в 1870 г. и Политехнической выставке в Москве в 1872 г. Система передачи знаний, как говорили «на кончиках пальцев», была введена в технических училищах России. Основу такой системы заложил Дмитрий Советкин, окончивший это Ремесленное учебное заведение. Разработанный им метод — первый научный анализ производственного, технологического процесса, обучающий оптимальному расходованию энергии, времени и сил; метод, созданный задолго до Тейлора, считающегося на Западе основоположником научной организации труда.

В ИМТУ с 1904 г. читался курс «Организация и оборудование механических заводов», который до того времени не читался нигде в мире (в университетах США

и Европы организацию производства начали изучать только в 1911 г. [2]. Президент Массачусетского института Джон Рункль, получив из России коллекцию моделей для обучения инженеров «русскому методу», в восторге написал директору ИМТУ Виктору Карловичу Дела-Восу: «За Россией признан полный успех в решении столь важной задачи технического образования... В Америке после этого никакая иная система не будет употребляться» [2]. Это лишь эпизод восстановленной энтузиастами истории инженерной мысли.

Государство способствовало организации научных и профессионально-технических обществ [3]. Российский премьер С.Ю. Витте уделял повышенное внимание совершенствованию специального образования, что способствовало резкому ускорению темпов промышленного роста в Российской империи. В России были открыты различные Общества для стимулирования развития науки, техники и поддержки, новых научно-инженерных проектов, учёных, изобретателей:

– «Императорское русское техническое общество» (1866 г.);

– «Общество для содействия русской промышленности и торговле» (1867 г.) и т.д.

При ИМТУ были созданы:

– «Политехническое общество» (1876 г.), снискавшее известность даже за пределами России. Учредил его вместе со своими товарищами талантливый инженер-предприниматель С.И. Лямин, окончивший ИМТУ с отличием;

– «Общество содействия успехам опытных наук и их практических применений», учреждённое Леденцовым



Христофором Семёновичем (1842-1907), крупным меценатом, купцом первой гильдии, в соответствии с его завещанием. Утверждено Министерством народного просвещения 24.02.1909 в совместном ведении Императорского Московского университета и Императорского Московского технического училища.

В сложный переломный период революционного преобразования в России и периода становления молодой Советской республики появились уникальные специалисты, которые в дальнейшем возглавляли Советскую науку и промышленность, запускали космические корабли. Одним из тех, кто понял важность научных основ в технологических знаниях и развивал связи образовательных учреждений с промышленностью, стал Эдуард Адамович Сатель (1885–1968). В дальнейшем – Герой Социалистического труда, начальник Главного технического управления наркомата вооружений и заведующий кафедрой производства артиллерийских систем [4].



Ещё будучи студентом ИМТУ (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана), с 1908 по 1910 гг. – работал техником на кафедре профессора В.И. Гриневецкого. После окончания ИМТУ (1912-1913) аспирант Э.А. Сатель был командирован для изучения опыта организации промышленности в Германию, Англию, Швейцарию. Он принял революцию 17-го года и в 1922–1923 гг.

был назначен членом правления по технической части Государственной Центральной технической конторы ВСНХ в Москве. В качестве технического директора руководил организацией производства на первом советской индустрии – Сталинградском тракторном заводе. Там же в Сталинграде была основана кафедра «Технология машиностроения», которая выпускает инженеров и по настоящее время.

С 1937 по 1939 гг. Э.А. Сатель работал заместителем начальника и главного инженера 3-го Главного Управления Наркомата Оборонной промышленности г. Москвы, а затем и председателем Техсовета, начальником Технического Управления и членом коллегии наркомата вооружения СССР. Руководя Главным техническим управлением наркомата вооружений, он понимал важность подготовки специалистов-технологов для оборонных отраслей. В то время в ряде вузов начали формировать технологические кафедры оборонной направленности для специальной, объектно-ориентированной технологической подготовки инженеров. Такие кафедры были созданы в январе 1940-го в МВТУ им. Н.Э. Баумана. Первыми заведующими кафедр стали И.П. Кузнецов (факультет «Н») и Э.А. Сатель (факультет «Е»), возглавивший кафедру «Производство артистем» («ПРА-Е»).

В предвоенный, военный период и после Великой Отечественной войны (1937–1947) Э.А. Сатель стоял у истоков создания и руководства новыми научно-исследовательскими институтами: ГСПИ-7, НИТИ-40 и ряда других. В тот

период рождалось сотрудничество в области научно-практических изысканий между ГСПИ-7, НИТИ-40 и МВТУ им. Баумана [4]. Его важной задачей, поставленной временем, была реорганизация и реконструкция десяти заводов 3-го Главного управления НКОП на базе внедрения методов массового и поточно-массового производства.

Так в 1940 г. Постановлением Совета народных комиссаров СССР и Приказом Народного комиссариата вооружения СССР на базе ЦКБ-40, ГСПИ-3 и технологической части ГСПИ-7 создаётся ГСПКИ-40 – (Государственный союзный проектно-конструкторский институт №40) для осуществления технической помощи заводам при разработке и внедрении прогрессивных технологических процессов и специального оборудования на предприятиях по производству стрелкового вооружения и боеприпасов. В 1946 г. ГСПКИ-40 преобразуется в Научно-исследовательский технологический институт №40 (НИТИ-40).



Нельзя не вспомнить ещё одного организатора производства, работавшего в НИТИ-40 и одновременно педагогом-методистом в МВТУ на кафедре производства артистем – Ананьева Сергея Левановича (1899–1970). Его знания и опыт были очень важны для обучения студентов. За плечами Сергея Левановича – опыт эвакуации заводов за Урал, работа Главным инженером на заводе в Мотовилихе, участие

в качестве представителя Министерства вооружений в составе Межсоюзнической репарационной комиссии в Германии. Несколько лет (1946–1955) связаны с его работой заместителем директора по научной работе отраслевого технологического института НИТИ-40 (ФГУП «НПО «Техномаш»). При его участии осуществлялась технологическая подготовка производства баллистических ракет на Южном машиностроительном заводе (г. Днепропетровск). В тот период С.А. Ананьев прошёл все ступени научного роста: стал кандидатом, а затем доктором наук, доцентом, профессором. Был проректором, заведовал кафедрой «Технология машиностроения» в Академии оборонной промышленности, созданной по инициативе и под руководством Э.А. Сателя.

Научному сообществу СССР С.А. Ананьев известен научными публикациями в области скоростного точения металлов и обработки с подогревом электротоком в зоне резания. Им сформулированы научные основы технологичности, разработаны теория и технология получения рациональных заготовок, заложены основы технологии резания труднообрабатываемых металлов. В научном багаже С.Л. Ананьева около 60 опубликованных работ, под его руководством защищено 40 кандидатских диссертаций (из них 13 аспирантами МВТУ).

С 1956 г. и до последних дней деятельность С.Л. Ананьева связана с технологической кафедрой М-8 МВТУ. Под его руководством в лаборатории производились исследования по обеспечению живучести следящих гидро-



приводов зенитных артиллерийских систем, стабилизаторов положения танковых пушек, а также по обеспечению прочности и герметичности стеклопластиковых труб с металлическими законцовками в корпусах твёрдотопливных ракет. На кафедре во многом раскрылся его талант педагога-методиста: он возглавлял учебно-методические семинары и методическую комиссию факультета, был научным редактором 28 капитальных научных трудов.

Таков портрет одного из основоположников технологии и производства артиллерийских систем и ракетного оружия, видного учёного и замечательного педагога-методиста МВТУ имени Н.Э. Баумана Сергея Левановича Ананьева.

С тех пор проделана огромная работа в различных областях технологической науки: электрохимической и электроэрозионной обработки труднообрабатываемых материалов; неразрушающего контроля; высокотемпературной пайки; осаждения тугоплавких материалов из газовой фазы; плазменного напыления тугоплавких покрытий; намотки композитных конструкций ракетной техники; организации переналаживаемых производств.

Комплекс совместных работ в области импульсной обработки материалов удостоился Премии Правительства СССР. Лауреатами премии от НПО «Техномаш» стали С.М. Поляк, Р.Л. Новобратский, Р.Р. Юстус, от МВТУ – Ю.П. Жбанков, от НИИТ – В.С. Сотников.

В конце 50-х годов XX века в промышленности активно решались проблемы создания быстропереналаживаемого оборудования и автоматизированных комплексов. Начались работы по созданию более крупных и сложных автоматизированных объектов – цехов, производств и целых заводов, приспособленных для многопредметного поточного производства, гибко перестраиваемого в необходимых случаях. Значительный вклад в развитие научно-технического сотрудничества в этой области внесли заведующие технологической кафедрой М-8 Г.А. Киселев и В.С. Камалов. Под руководством Геннадия Алексеевича Киселева (1974–1985) решался широкий круг научных проблем автоматизации производственных процессов: от технологической подготовки производства до планирования и диспетчеризации производства на машиностроительном предприятии. Это соответствовало комплексному подходу Э.А. Сателя при организации производства. В этот период коллективом технологической кафедры были налажены тесные творческие связи с ведущими отраслевыми институтами ЦНИТИ, ИНИТИ, ЦНИИТМ, НИИТ и такими крупными машиностроительными заводами, как Ижмаш, завод им. Дегтярева (г. Ковров), завод «Точмаш» (г. Владимир), Воткинский машиностроительный завод, Южный машиностроительный завод (г. Днепрпетровск), Курганский завод колёсных тягачей (г. Курган), Муромский приборостроительный завод и другими предприятиями.

На протяжении всего времени заведования кафедрой М-8 Г.А. Киселевым особое место во взаимоотношениях с промышленностью занимало сотрудничество

с НИТИ-40, который в соответствии с приказом МОМ СССР от 06.03.1966 №109сс переименован в Научно-исследовательский институт технологии машиностроения (НИИТМ).



Краткий портрет Г.А. Киселева как учёного, организатора и общественного деятеля: После защиты докторской диссертации (1974) и избрания деканом Машиностроительного факультета (1975) Г.А. Киселев возглавил технологическую кафедру (М-8). В 1976 г. при его руководстве произошло укрупнение научных направлений кафедры – проводилась большая работа по созданию единых принципов конструкторской и технологической подготовки инженеров-механиков, результаты которой обсуждались на Учёном Совете МВТУ с приглашением работников промышленности из оборонных министерств. Рекомендации в дальнейшем были учтены при разработке новых учебных планов как в МВТУ, так и на базовых кафедрах ведущих предприятий.

В тот период были созданы два филиала кафедры: в НПО «Техномаш» и в НПО «Композит». Заведование филиалами кафедр возложили на себя генеральные директора предприятий – профессора, д-ра техн. наук В.А. Исаченко и С.П. Половников. Продолжилось совершенствование учебного процесса подготовки технологов, резко возрос научный потенциал. Этому способствовало создание Г.А. Киселевым двух Специализированных советов по защите диссертаций. Он активно содействовал развитию Координационного совета. При нём технологическая кафедра существенно повысила свой учебный и научный потенциал в условиях устойчивого роста научных кадров. Последней работой Г.А. Киселева явилась НИР на тему «Создание завода будущего», опередившая время, в которой была попытка создания комплексного автоматизированного предприятия, с гибкой структурой, охватывающей все стадии производства продукции.

В эти годы на технологической кафедре М-8 в МВТУ разработали и модифицировали широкую гамму станков и оснастки для изготовления намоткой композитных конструкций сложной формы, для вибростерления и виброрезания труднообрабатываемых материалов, резания с опережающим пластическим деформированием, для физико-технической обработки материалов и многое другое.

Годы руководства кафедрой Г.А. Киселева явились годами организационного и методического укрепления кафедры и повышения её престижа как внутри МВТУ, так и в оборонной и космической отраслях. Большинство практических занятий были перенесены на филиал кафедры в НПО «Техномаш». Совместное участие в учебном процессе способствовало подготовке кадров для предприятия, в том числе кадров высшей квалификации. За эти годы научные степени получили: В.А. Исаченко (науч-



ный консультант Г.А. Киселев), В.В. Булавкин (научный консультант В.С. Камалов), А.В. Медарь (научный руководитель кандидатской диссертации В.Г. Саксельцев), А.В. Кибальченко (научный консультант В.Н. Подураев), Е.В. Матвеев (научный руководитель кандидатской диссертации Л.А. Кашуба). Творческие связи с НПО «Техномаш» способствовали обновлению станочного парка учебной лаборатории и заключению хозяйственных договоров на проведение НИР, в рамках которых выполнено много диссертационных исследований.

В трудные 90-е благодаря НПО «Техномаш» кафедре удалось оснаститься оборудованием. Была успешно проведена серия совместных НИР в области ФКП. Стали традиционными ежегодные встречи студентов с ведущими специалистами предприятия в рамках «Ярмарок вакансий». В НПО «Техномаш» (ФГУП «НПО «Техномаш») проводились учебно-ознакомительные, технологические и преддипломные практики студентов. На каждом курсе кафедры обучались 1-3 студента-целевика от предприятия по специальности 24.05.01 – проектирование, произ-

водство и эксплуатация ракет (специализация – производство и технологическая обработка изделий РКТ).

В общей сложности к 2009 году, несмотря на массовый отток специалистов в период перестройки и последующего времени, в коллективе ФГУП «НПО «Техномаш» трудились 18 выпускников МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана. Из них семь специалистов высшей квалификации: шесть кандидатов и один доктор наук, три старших научных сотрудника. А с 2010 г. работниками предприятия стали 58 человек, окончивших МГТУ, пять из них имеют учёную степень кандидата технических наук [6].

В период с 1985 по 2017 гг. происходит консолидация учёных-технологов и формирование технологического раздела научной программы «Университеты России», под руководством академика РАН К.С. Колесникова при ВАК РФ организуется Головной Совет «Машиностроение». Успех преобразований во многом определен активной деятельностью заведующих кафедрой СМ-12 (М-8): В.С. Камалова (1985–1997), В.А. Тарасова (1997–2016) и А.Л. Галиновского (с 2016 г. по настоящее время).



К.С. Колесников



В.С. Камалов



В.А. Тарасов

Одним из важных событий того периода стало образование из двух научных направлений новых кафедр МГТУ им. Н.Э. Баумана – РК-9 «Автоматизация управления технологическими процессами» (1997 г. – заведующий кафедрой, профессор В.Ф. Горнев) и СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» (2002 г. – заведующий кафедрой, профессор И.М. Буланов).

На протяжении своей истории кафедра привлекала к учебной работе ведущих специалистов космической отрасли. Большой вклад в развитие учебного процесса в качестве официальных совместителей внесли: генеральные директора В.А. Исаченко и С.П. Половников, В.А. Моисеев, главный технолог и главный химик РКК «Энергия» Н.В. Полухин и В.А. Романенков, специалисты РКК «Энергия» А.И. Ломакин и А.В. Бараев (заместитель директора по научной работе ФГУП «НПО «Техномаш»), начальник отдела ГКНПЦ им. Хруничева М.П. Ананьев. Большой вклад в дело организации практик во ФГУП «НПО «Техномаш» внес Ю.П. Астахов.

Председателями Государственной Экзаменационной Комиссии в разные годы были такие выдающиеся специалисты ракетно-космической отрасли, как: В.В. Булавкин, А.Ф. Стрекалов, В.А. Моисеев.

Значительный вклад в развитие учебного процесса внесли совместно подготовленные учебники и учебные пособия. Среди них знаковым стал учебник «Технология производства ЖРД», подготовленный коллективом авторов под редакцией Г.А. Киселева и В.А. Исаченко, ставший основой для создания под руководством В.А. Тарасова серии учебников и учебных пособий под общим названием «Технологии ракетно-космического машиностроения», которые на протяжении длительного периода явились основой обучения студентов кафедры СМ-12 и смежных кафедр МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также родственных аэрокосмических университетов. В этой серии появились такие книги, как: В.А. Тарасов, Л.А. Кашуба «Теоретические основы технологии ракетостроения», В.А. Моисеев, В.А. Тарасов, В.А. Колмыков, А.С. Филимонов «Технология производства ЖРД», А.Ф. Пузырьков «Теоретические основы плазменного напыления покрытий», М.А. Комков, В.А. Тарасов «Технология намотки композитных конструкций и средств поражения», Д.А. Ягодников, В.А. Калинин «Технология производства ракетных двигателей на твёрдом топливе».

Таким образом, появившийся на рубеже XX-XXI веков «Русский метод подготовки инженерных кадров»,

несмотря на все трудности настоящего времени, включая отсутствие законодательных актов, обязывающих предприятия отрасли участвовать в учебном процессе, актуален и сейчас. На это указывают результаты проведенного в 2013 г. круглого стола с привлечением сотрудников МГТУ им. Баумана под руководством руководителя НУК СМ В.Т. Калугина, ФГУП «НПО «Техномаш» под руководством заместителя директора по научной работе ФГУП «НПО «Техномаш» А.В. Бараева и еженедельником «Независимое военное обозрение» (итоги мероприятия в номере от 19 апреля 2013 года):

- космическую технику нового поколения будут делать на основе современных технологий, молодые учёные и конструкторы, используя современные технологии, основанные на тесной связи образования, науки и производства. Через десять-двадцать и более лет нынешние выпускники-технологи, будут руководить программами освоения планет солнечной системы, основываясь на современных технологиях уже нового экономического и технологического уклада.

Основой производительных сил нового экономического и технологического уклада в постиндустриальной экономике будет выступать интеллектуальный капитал конкретного работника с его эксклюзивными индивидуальными компетенциями, которые он может получить

только в образовательном секторе – «локомотиве» формирования «новых производительных сил» и плацдарме развития соответствующих производственных отношений, поддерживаемыми, с одной стороны, научно-учебным заведением, с другой стороны – передовой технологической, инжиниринговой корпорацией с широким диапазоном работ, охватывающим как машиностроительные технологии и менеджмент, так и другие отрасли экономики.

#### Список литературы

1. Научные школы МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005.
2. Русская система обучения ремёслам. Истоки и традиции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Т. 1. С. 94.
3. Горохов В.Г. Техника и культура: возникновение философии техники и теории технического творчества в России и Германии в конце XIX – начале XX столетия. М.: Логос. 2010.
4. Сателъ Э.А. Школа технологии машиностроения. М.: Спектр. 2011.
5. Независимое военное обозрение от 19.04.2013. Еженедельное приложение к «Независимой газете».
6. Статистическая информация. Представлена отделом кадров ФГУП «НПО «Техномаш».

УДК 629.7.658.3

*Бичурин Х.И., Ковков Д.В., Болдырев Д.А.*

### Анализ и оценка результативности научной деятельности ФГУП «НПО «Техномаш» на основе баз данных научного цитирования

Статья посвящена анализу и оценке результативности научной деятельности ФГУП «НПО «Техномаш» на основе баз данных научного цитирования

**Ключевые слова:** методика оценки научной деятельности, научный потенциал, интеллектуальная собственность.

В условиях усиления конкуренции на мировом космическом рынке, важное значение приобретает повышение эффективности всех направлений деятельности организаций космической отрасли, особенно научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), являющихся основой инновационной деятельности. Для объективного анализа научной деятельности организаций космической отрасли необходимо проведение всесторонней оценки её результативности.

В соответствии с пунктом 4 Правил оценки результативности деятельности научных организаций, выполняющих НИОКР и технологические работы гражданского назначения [1], типовой методикой оценки результативности деятельности научных организаций, выполняющих НИОКР и технологические работы гражданского назначения [2], утверждена методика оценки результативности деятельности научных организаций, подведомственных Госкорпорации «Роскосмос», выполняющих НИОКР и технологические работы гражданского назначения [3].

Оценка результативности в соответствии с методикой Госкорпорации «Роскосмос» проводится на основе анализа и сопоставления показателей по следующим направлениям:

- научный потенциал и эффективность научных исследований;
- вовлечённость научной организации в национальное и мировое научно-образовательное сообщество;
- коммерциализация и прикладное значение результатов исследований;
- кадровая обеспеченность научной организации;
- ресурсная обеспеченность научной организации;
- состояние финансовой деятельности научной организации.

Определены следующие критерии оценки результативности деятельности научных организаций по вышеуказанным направлениям:

1. Научный потенциал и эффективность научных исследований:



- общая характеристика научного потенциала;
  - публикационная активность;
  - объекты интеллектуальной собственности.
2. Вовлечённость научной организации в национальное и мировое научно-образовательное сообщество:
- участие в международном научно-техническом сотрудничестве;
  - интеграция науки и образования.
3. Коммерциализация и прикладное значение результатов исследований:
- использование инновационных технологий;
  - взаимодействие с реальным сектором экономики;
  - инновационная инфраструктура.
4. Кадровая обеспеченность научной организации:
- обеспеченность исследователями;
  - подготовка научных кадров.
5. Ресурсная обеспеченность научной организации:
- обеспеченность научным оборудованием и необходимыми условиями для научной работы.
6. Состояние финансовой деятельности научной организации:
- доходы научной организации;

- расходы научной организации;
- структура внутренних затрат на исследования и разработки.

Оценка результативности научной деятельности ФГУП «НПО «Техномаш» осуществляется на основе анализа таких критериев, как публикационная активность и наличие объектов интеллектуальной собственности (прежде всего патентов на научные разработки), а также на сравнении данных показателей ФГУП «НПО «Техномаш» с аналогичными показателями других предприятий РКП, других референтных групп организаций Российской Федерации и других стран, осуществляющих научную деятельность (рис. 1). Для сравнительной оценки результативности выбранных предприятий использованы предложенные в системе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) инструменты анализа на базе ряда основных показателей. Эти показатели также входят в число показателей типовой методики оценки результативности деятельности научных организаций, выполняющих НИО-КР и технологические работы гражданского назначения, утверждённой приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.10.2009 №406.

Показатели	Показатели										
	Все организации (3269)	Ведомственные НИИ (25)	ГНЦ (48)	Университеты(60)	Корпоративный сектор (166)	РАН (394)	Росатом (29)	РКП (12)	ВУЗы МО РФ (21)	Научные организации Республики Беларусь (96)	Республики Казакстан(44)
Число публикаций за последние 5 лет											
Среднее число публикаций на 1 автора в год											
Число цитирований за последние 5 лет											
Среднее число цитирований на публикацию											
Доля публикаций не имеющих цитирования											
Коэффициент самоцитирования											
Число статей в научных журналах											
Число патентов											
Число статей в зарубежных журналах											
Число публикаций в сотрудничестве											
Средневзвешенный импакт-фактор											
Индекс Хирша											

Рис. 1. Бенчмаркинг. Показатели, по которым ФГУП «НПО «Техномаш» входит в 25% научных организаций, имеющих относительно лучшие (красный цвет) и худшие (серый цвет) показатели в различных референтных группах

Результаты проведённого анализа показывают, что во многих референтных группах показатели ФГУП «НПО «Техномаш» входят в 25% лучших или являются средними. Лишь в сравнении с двумя референтными группами, такими как университеты и организации РАН, показатели предприятия можно охарактеризовать как относительно

слабые, что легко объясняется преимущественно научной направленностью деятельности организаций данных двух групп.

По сравнению со многими референтными группами высокие показатели ФГУП «НПО «Техномаш» стали результатом целенаправленной научной деятельности, осу-



ществляемой как непосредственно на предприятии, так и во взаимодействии с другими научными организациями.

Необходимо отметить тот факт, что, начиная с 2013 года, в рамках ОКР для предприятий отрасли изготовлено более 100 единиц опытных образцов специального технологического оборудования, получено 40 патентов.

Для повышения научной результативности на предприятии осуществляется подготовка кадров высшей научной квалификации на базе аспирантуры и докторантуры, работает диссертационный совет по специальностям основного профиля деятельности, осуществляется материальное стимулирование в форме надбавок работникам, имеющим учёные степени кандидата и доктора наук.

В целях повышения научных компетенций во ФГУП «НПО «Техномаш» создано несколько базовых кафедр совместно с ведущими вузами Москвы, осуществляющими магистерскую подготовку специалистов по технологии, управлению и экономике. За три года работы кафедр успешно защитили магистерские диссертации более 40 работников предприятия.

С 2016 года ежеквартально издаётся научно-технический бюллетень «Вестник «НПО «Техномаш», в котором учёные и специалисты предприятия размещают научные публикации, результаты конструкторско-технологических разработок. Вестник «НПО «Техномаш» размещается в национальной библиографической базе данных научного цитирования – РИНЦ (рис. 2).



Рис. 2. Размещение Вестника «НПО «Техномаш» в научной электронной библиотеке

Такой целенаправленный подход к осуществлению научной деятельности даёт положительные результаты. По показателям количества авторов научных публикаций, количества статей и их цитируемости, интереса, проявленного к опубликованным работам, учитывая число работающих, ФГУП «НПО «Техномаш» превосходит другие головные научно-исследовательские организации отрасли. Значительный рост в последние годы отмечен и по абсолютному значению данных показателей (рис. 3, 4).

### Публикационная активность

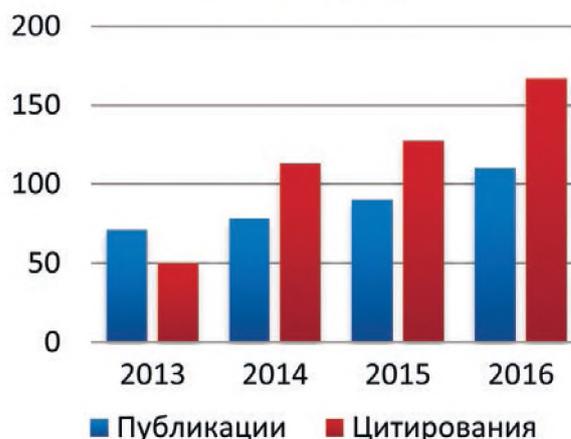


Рис. 3. Динамика количества публикаций работников ФГУП «НПО «Техномаш» и их цитируемости в системе РИНЦ

### Динамика просмотров публикаций



Рис. 4. Динамика просмотров и загрузок публикаций работников ФГУП «НПО «Техномаш» в системе РИНЦ



Вместе с тем в ходе анализа и оценки научной результативности выявлены определённые недостатки в организации научной работы ФГУП «НПО «Техномаш», которые сдерживают рост наукометрических показателей:

- многие работники не зарегистрированы в наукометрических базах данных;
- авторы публикаций не имеют привязки к своей организации;
- не используются существующие возможности РИНЦ по работе с публикациями авторов и их цитированием;
- на предприятии не организована систематическая работа ответственных представителей по работе с РИНЦ и привлечение авторов к работе со списками своих публикаций.

Кроме того, необходимо отметить низкую библиографическую культуру авторов публикаций, что приводит к большому количеству ошибок, нераспознанным ссылкам, отсутствию идентификации работ и ссылок по отношению к авторам и их организации. В результате имеет место занижение наукометрических показателей по отношению, например, к университетам и структурам РАН, в которых работа с базами данных научного цитирования организована на более высоком уровне (рис. 1).

Для повышения качества и цитируемости научных публикаций разработаны различные методические рекомендации [4]. Рекомендуемые способы повышения цитируемости научных публикаций:

- проведение качественной библиографической работы по тематике НИОКР, изучение источников информации и авторов;
- мониторинг публикаций коллег в рамках тематики исследований, налаживание с ними контактов, обязательные ссылки в своих работах на их труды;

– качественная исследовательская работа, сопровождающаяся подготовкой публикаций в цитируемых журналах, имеющих высокий импакт-фактор и др.

### Выводы

Базы данных научного цитирования являются сегодня важным источником количественного анализа и сравнительной оценки научной результативности деятельности научных организаций РКП, используемым Госкорпорацией «Роскосмос» для оценки научной деятельности. Поэтому во ФГУП «НПО «Техномаш» необходимо больше внимания уделять развитию научной сферы деятельности и использовать существующие для этого возможности РИНЦ.

### Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 08.04.2009 № 12. URL: <http://base.garant.ru/195302/>
2. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.10.2009 №406. URL: <http://base.garant.ru/197371/>
3. Приказ Федерального космического агентства от 10.10.2013 №199. URL: <http://base.garant.ru/70575558/>
4. Методические рекомендации по подготовке и оформлению научных статей в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных / Ассоциация научных редакторов и издателей; под общ. ред. О.В. Кирилловой. М, 2017. 144 с.
5. Ковков Д.В., Бичурин Х.И., Болдырев Д.А., Смолова Э.А. Анализ и оценка результативности НИОКР предприятий ракетно-космической промышленности на основе баз данных научного цитирования // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т. 8. № 1. С. 105-116. doi: 10.18334/vines.8.1.38868

## ◆ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГИРОСКОПОВ И ПРИБОРОВ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

УДК 921.91.06-755:621.9.048.7

*Кузнецов В.С., Камалдинов А.М.*

### Отработка комбинированной технологии корректировки масс при балансировке ротора двигателя-маховика

В данной работе рассматривается комбинированная технология корректировки масс ротора двигателя-маховика, включающая последовательное выполнение операций механической и лазерной обработки.

**Ключевые слова:** динамическая балансировка, корректировка масс, станок, ротор, двигатель-маховик, силовой гироскоп, гироскоп, лазер, лазерная обработка, механическая обработка.

#### Введение

Традиционно корректировка масс при балансировке роторов гироскопов выполняется путём удаления материала из тела ротора в «тяжёлом» месте либо установки (перемещения) грузов в противолежащее ему «лёгкое» место. Преимущественно применяется первый способ.

При этом материал удаляется, как правило, методами механической обработки. Реже с этой целью используются бесконтактные методы обработки, в том числе – лазерная обработка.

По сравнению с механической обработкой лазерная корректировка масс позволяет достичь лучшей точности

балансировки: материал может удаляться порциями, не превышающими долей микрограмма. Важным преимуществом метода является отсутствие механического контакта с ротором, что позволяет выполнять операции определения дисбалансов и корректировки масс в рамках единого цикла, без остановки вращения ротора. Следует отметить, что метод обладает и рядом недостатков, в частности – относительно невысокой производительностью процесса.

Первые экспериментальные и опытные образцы станков для лазерной балансировки, оснащённые мощными лазерами с миллисекундной длительностью импульсов, позволяли удалять до нескольких миллиграмм материала за единичное воздействие [1, 2]. Корректировка масс импульсами с энергией порядка 10 Дж могла приводить к нежелательным структурным изменениям материала, ударным нагрузкам на шарикоподшипниковые опоры и даже перегреву и деформации тонкостенных роторов.

В современных условиях перспективными представляются высокочастотные лазеры с ультракороткими импульсами [3], однако их использование для корректировки масс сделает балансировочное оборудование исключительно дорогостоящим. В связи с этим на текущий момент в конструкциях балансировочных станков применяются недорогие импульсные волоконные лазеры и лазеры на кристаллах с нано- и микросекундной длительностью импульсов, средняя выходная мощность которых обычно составляет от 10 до 20 Вт [4].

#### Характеристика технологии

Производительность систем лазерной корректировки масс, оснащённых указанными типами источников

излучения, может быть недостаточной при наличии существенного начального дисбаланса. Для динамической балансировки ротора с начальным дисбалансом, эквивалентным массе 500 мг на плоскость, потребуется не менее одной рабочей смены. В то же время для ряда гироскопов, таких как силовые гироскопы и двигатели-маховики, суммарная масса подлежащего удалению материала может быть на порядок больше. Требования к остаточному дисбалансу при этом предъявляются крайне жесткие – на уровне 0,05 г·мм/кг.

Для роторов силовых гироскопов и двигателей-маховиков была предложена двухэтапная технология балансировки:

- «грубая» балансировка, включающая 1–3 цикла корректировки масс методами механической обработки;
- «точная» балансировка, включающая 1 цикл лазерной корректировки масс.

Особенностью технологии является то, что в ходе выполнения первого этапа лазерная система корректировки масс балансировочного станка используется для разметки «тяжёлых» мест ротора в двух плоскостях коррекции. Затем, в соответствии с полученными отметками, необходимое количество материала удаляется на сверлильном станке, или иным методом механической обработки.

Отработка технологии проводилась на станке СБЛ-14 (ФГУП «НПО «Техномаш»), оснащённом системой лазерной корректировки масс ротора. В качестве балансируемого гироскопа использовался технологический образец двигателя-маховика ДМ-001-01 (АО «НИИ командных приборов»). Условия отработки технологии приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия отработки технологии

Частота вращения ротора, Гц (об/мин)	46,7 (2800)
Начальный дисбаланс, г·мм/кг (мг)	30,0 (500,0)
Остаточный дисбаланс после «грубой» балансировки, не более, г·мм/кг (мг)	0,3 (5,0)
Остаточный дисбаланс после «точной» балансировки, не более, г·мм/кг (мг)	0,03 (0,5)
Максимальное число циклов балансировки	4
Максимальное время балансировки, ч	2,5

#### Результаты отработки технологии

В ходе отработки неуравновешенное состояние ротора имитировалось установкой в каждую плоскость груза массой около 500 мг. Угловое положение грузов выбиралось случайным образом. Далее проводилось два или, при необходимости, три цикла «грубой» балансировки. Разметка «тяжёлых» мест ротора производилась в режиме работы лазера со средней энергией импульсов около 0,08 Дж в течение 10 секунд. Для корректировки масс гироскоп демонтировался с опор станка и устанавливался в приспособление для механической обработки. Остаточный дисбаланс

по результатам первого этапа балансировки варьировался в диапазоне от 1,5 до 4,0 мг на плоскость в пересчёте на массу.

По окончании первого этапа выполнялся один цикл «точной» балансировки. Лазерная корректировка масс производилась в режиме работы лазера со средней энергией импульсов около 0,17 Дж (рис. 1). Единичные воздействия производились на каждом обороте ротора в течение 15...30 минут в зависимости от величины начального дисбаланса, в автоматическом режиме. Остаточный дисбаланс по результатам второго этапа балансировки составлял от 0,25 до 0,5 мг.

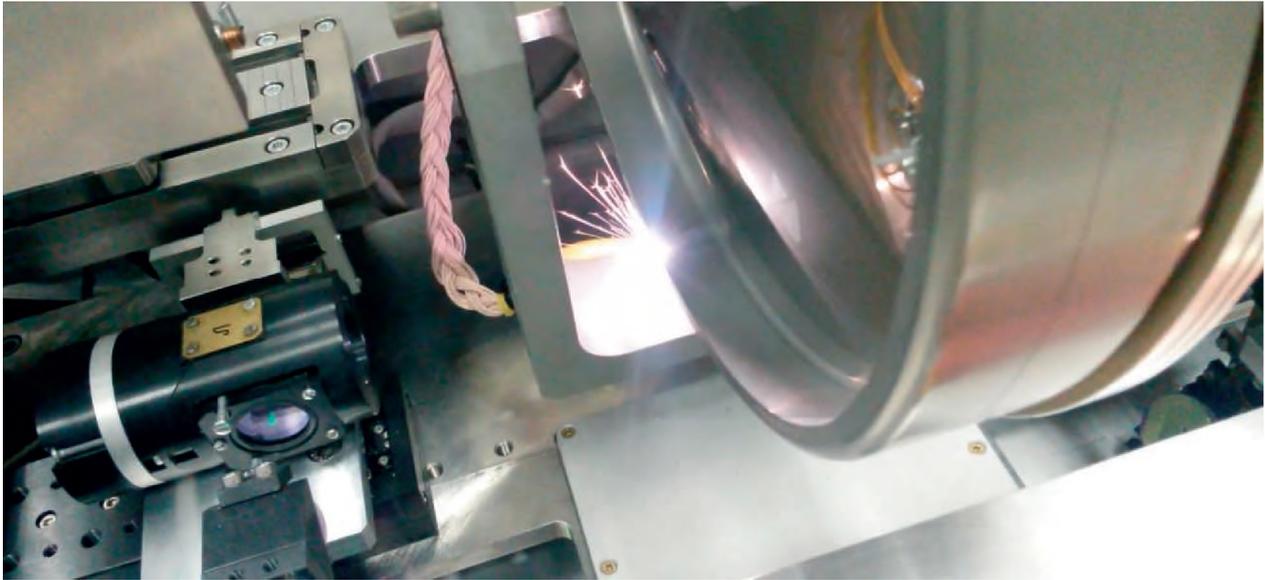


Рис. 1. Лазерная корректировка масс ротора двигателя-маховика ДМ-001-01 на станке СБЛ-14

По результатам ряда экспериментов среднее время, необходимое для балансировки одного ротора в соответствии с предложенной технологией, составило около двух часов. Типичный вид диаграммы уменьшения дисбаланса для балансировки, состоящей из 4 циклов, приведён на рис. 2.

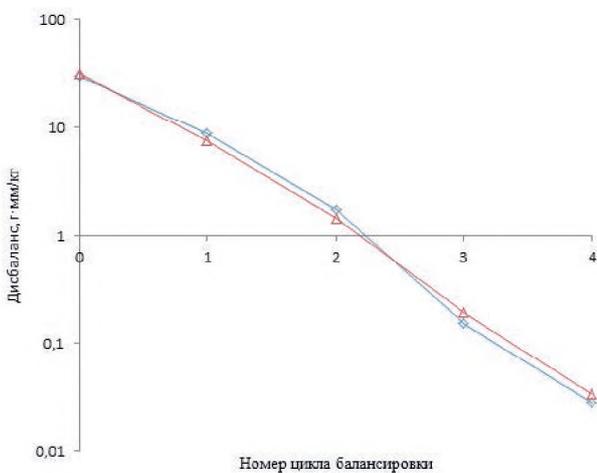


Рис. 2. Диаграмма уменьшения дисбаланса ротора (на диаграмме красный график соответствует левой плоскости коррекции, синий – правой плоскости)

### Заключение

В соответствии с результатами проведённой обработки, применение комбинированной технологии корректировки масс при балансировке ротора двигателя-маховика

обеспечивает необходимую производительность и высокую точность процесса. Осуществление лазерной разметки «тяжёлых» мест ротора перед механической обработкой снижает вероятность возникновения позиционных ошибок при удалении масс из тела ротора. Также предложенный подход позволяет существенно увеличить интервалы между процедурами технического обслуживания систем корректировки масс, связанными с заменой элементов накачки, что особенно актуально для источников лазерного излучения на газоразрядных лампах и элементов оптических систем, загрязняемых продуктами лазерной обработки.

### Список литературы

1. Laser Balancing Demonstration on a High-Speed Flexible Rotor/R.S. DeMUTH [and others]//Materials of Gas Turbine Conference & Exhibit & Solar Energy Conference, San Diego, California. 1979.
2. Промышленное применение лазеров/Под ред. Г.Кёбнера; Пер. с англ. А.Л.Смирнова; Под ред. И.В.Зуева. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
3. NanoBalancer. Fine Balancing System with precise Laser Ablation: [Электронный ресурс]. URL: [http://www.nanosystec.com/images/datenblaetter/nanosystec\\_NanoBalancer\\_WEB.pdf](http://www.nanosystec.com/images/datenblaetter/nanosystec_NanoBalancer_WEB.pdf) (дата обращения 19.02.2018).
4. Mamczur M., Gabzdyl J. High speed balancing with fiber lasers: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-27/issue-1/features/high-speed-balancing-with-fiber-lasers.html> (дата обращения 19.02.2018).

## ◆ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ РКП

УДК 629.7:657.6

*Рахмилевич Е.Г., Черемисин Д.А., Новиков П.П., Шепелева В.Ю.,  
Уразова Т.А., Фонушев В.Г., Чернодод И.И.*

### Методическое обеспечение проведения технологического аудита (технологического обследования) на предприятиях РКП

В современных условиях, при высоком уровне конкуренции и постоянно изменяющейся экономической ситуации, перед руководством различных организаций встают задачи по их адаптации к новым условиям за счёт разработки и реализации эффективных управленческих и организационно-технологических решений. Разработка таких мероприятий связана с выбором оптимальных способов достижения поставленных целей (в рамках стратегии развития организации) с учётом воздействия на них различных факторов. Одним из методов, применяемых для оценки предприятий, является технологический аудит, суть которого заключается в проведении комплексного исследования, анализа организаций и разработке мероприятий, необходимых для изменения ситуации. На базе полученных рекомендаций впоследствии формируется стратегия их развития.

Технологический аудит – это способ проверки производственно-технологического состояния предприятия с помощью определённых критериев, дающий возможность выявления его сильных и слабых сторон, что ведёт к формированию стратегии развития, направленной на повышение эффективности организации. Целью технологического аудита является оценка производственно-технологического потенциала предприятий, выявление и анализ взаимосвязей производственной программы выпуска (в том числе перспективной, включающую подготовку производства перспективных изделий РКТ) с состоянием производственно-технологической базы предприятия, выдача рекомендаций и разработка мероприятий по совершенствованию производственно-технологической базы. Основной частью технологического аудита является технологическое обследование. Установленные в процессе такого обследования взаимосвязи являются необходимыми исходными данными для разработки в дальнейшем программ инновационного развития, планов технологического перевооружения, реконструкции и оптимизации производственных мощностей предприятий.

Важно отметить, что технологическое обследование предназначено для решения различных задач деятельности организации. Так на рис. 1 представлены основные направления технологического обследования.

В зависимости от выбранных направлений проведения технологического обследования, типовыми задачами могут быть:

- определение производственно-технического потенциала предприятия по состоянию «как есть» и выявление факторов, влияющих на него;

- определение проблемных и «узких мест» и степени их влияния на выполнение производственной программы;
- выявление производственных потерь, которые возникают вследствие недостатков организации производства, планирования, несовершенного технического уровня и др.;
- анализ производственной системы предприятия на предмет возможности выполнения производственной программы требуемого качества;
- оценка соответствия производственных мощностей цехов и участков основного производства показателям производственной программы;
- оценка фактических циклов производства изделий РКТ;
- оценка обеспеченности производства оборудованием и оценки эффективности его использования;
- анализ системы планирования и организации производства;
- оценка показателей эффективности деятельности предприятия;
- оценка организационно-технических мероприятий, обеспечивающих заданные (оптимальные) показатели эффективности.

Применение технологического обследования позволяет обеспечить эффективное управление инвестициями, минимизировать производственно-финансовые риски при модернизации производств.

В настоящее время в ракетно-космической промышленности отсутствует утверждённая методика технологического аудита (технологического обследования).

Несмотря на то что, на рынке существует достаточное количество компаний, занимающихся проведением технологического аудита (технологического обследования), большинство из них носят инжиниринговый характер и предоставляют предприятиям-заказчикам результат, направленный на закупку зарубежного оборудования, поставщиками которого они являются. Методики проведения технологического аудита в большинстве случаев являются ноу-хау организаций-аудиторов и составляют коммерческую тайну, поэтому публикуются в основном в виде рекламных статей, а с работниками, как правило, заключаются соглашения о конфиденциальности.

Учитывая специфику ракетно-космической промышленности, в том числе режимность предприятий, высокую наукоемкость продукции и длительный жизненный цикл изделий перед специалистами ФГУП «НПО «Техномаш» встала задача по созданию отраслевой методики технологического обследования.

Для формирования единого подхода и учитывая собственный накопленный опыт технологического обеспечения создания изделий РКТ, ФГУП «НПО «Техномаш» была разработана методика технологического обследования предприятий ракетно-космической промышленности.

Разработанная методика устанавливает общий порядок проведения технологического обследования, требования к исходным данным, порядок их сбора и обработки, алгоритм

проведения анализа и оценки производственно-технической базы предприятия, систематизации выявленных проблем и «узких» мест производства, разработки предложений по их решению, требования к отчетной документации.

Укрупнённая схема проведения технологического обследования представлена на рис. 2.

Технологическое обследование, проводимое ФГУП «НПО «Техномаш», осуществляется в три этапа.

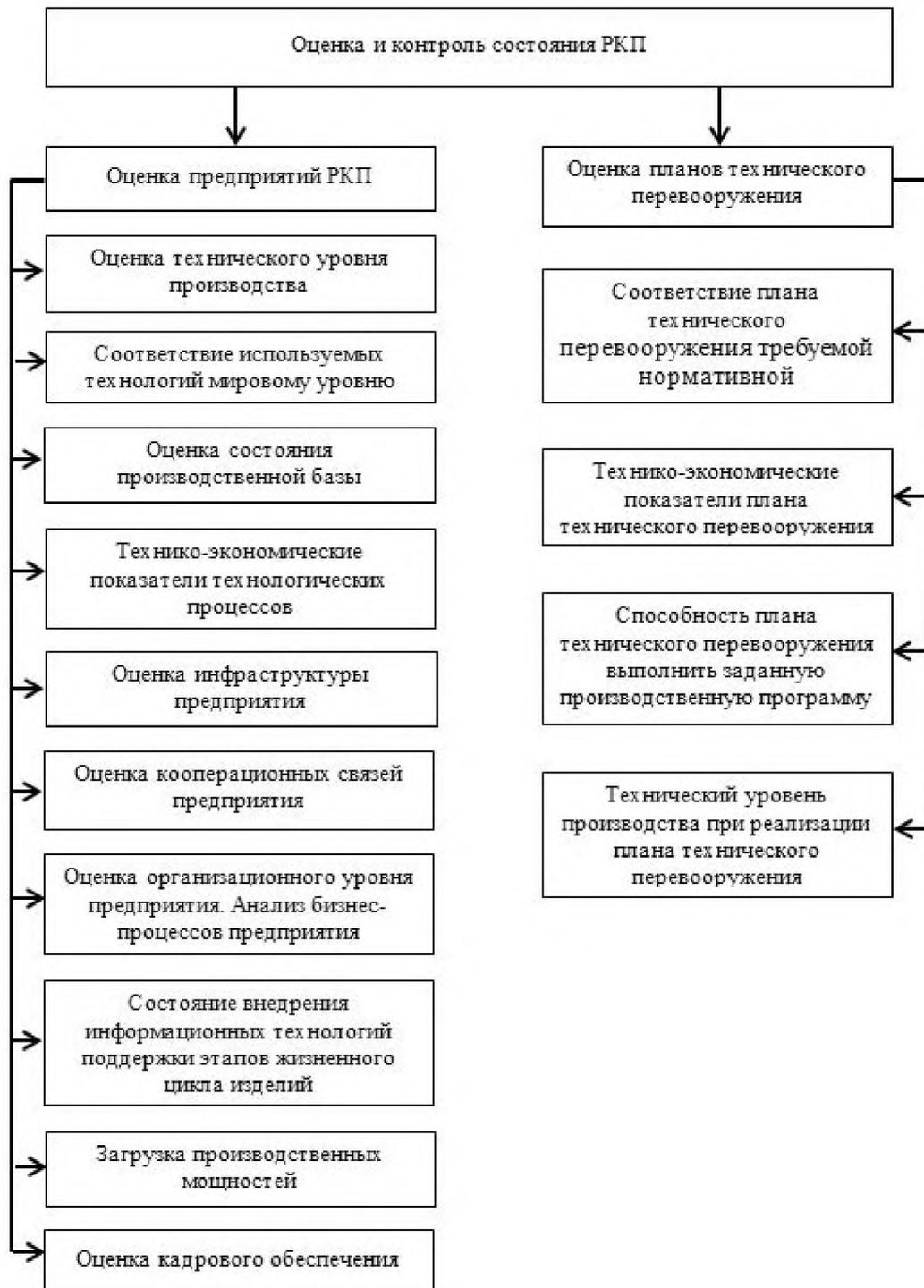


Рис. 1. Основные направления технологического обследования

Первым этапом технологического обследования является сбор и оценка исходных данных в соответствии с техническим заданием, разработанным Заказчиком.

На данном этапе методика устанавливает требования к исходным данным, порядок их сбора и обработки.

Важнейшим вопросом сбора исходных данных является точное определение источников получения необходимых сведений. Это позволяет четко определить место и способ получения информации в соответствии с планом проведения технологического обследования и придать работе целенаправленный характер.

Базовым источником информации для проведения технологического обследования служит производственно-технологический паспорт предприятия, оформленный

в соответствии с приказом Госкорпорации «Роскосмос» от 15.03.2017 №69 «О проведении производственно-технологической паспортизации организаций Госкорпорации «Роскосмос».

На этом этапе производится получение исходных данных в виде документов и заполненных форм.

В ходе выполнения работ проводится сбор и первичная оценка полученной информации, затем уточняются исходные данные и формируется детальный план технологического обследования, являющийся основой для подготовки и реализации второго этапа, технологическое обследование проводится непосредственно на производственных площадках проверяемого предприятия.

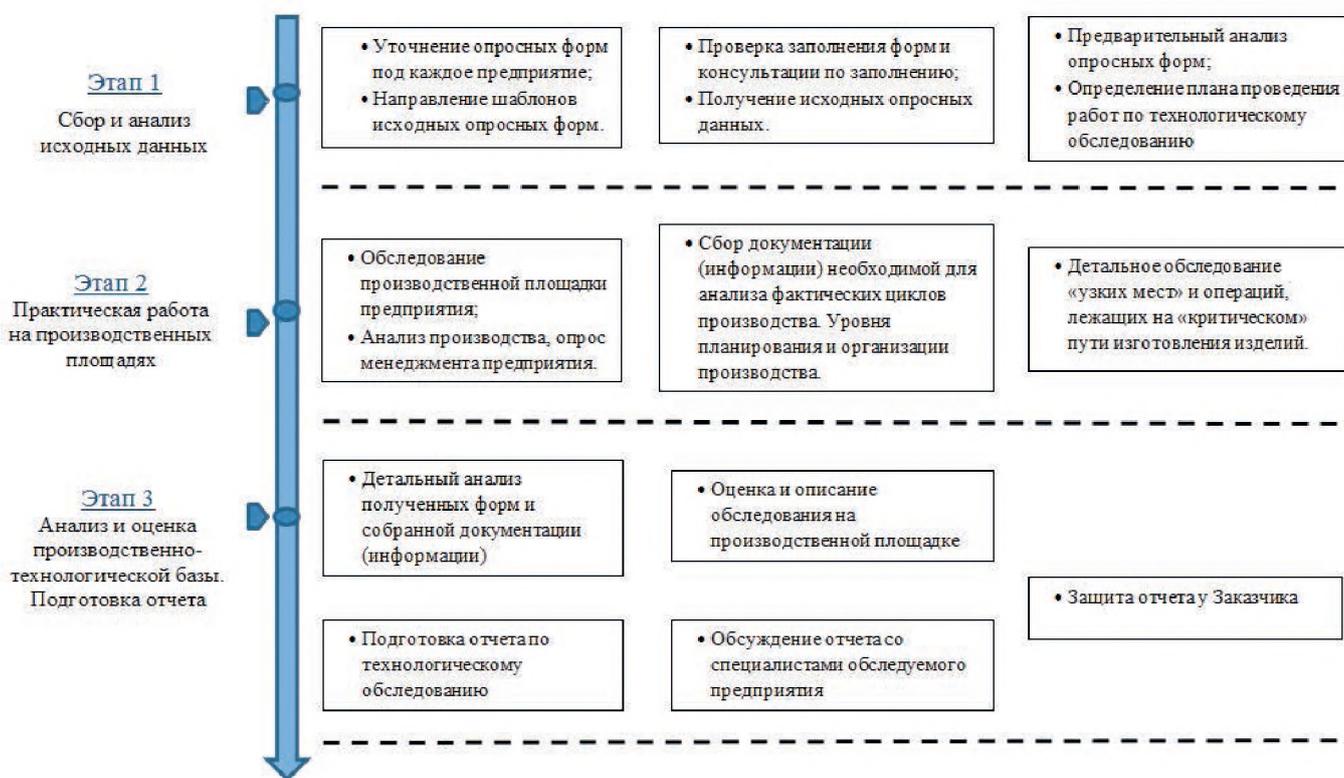


Рис. 2. Структурная схема этапов технологического обследования

Содержание второго этапа состоит в проведении работ и посещении производственных подразделений основного и инструментального производств на территории проверяемого предприятия в целях определения текущего состояния производства и верификации представленной ранее информации «на месте». В ходе реализации этапа выполняется обход производства, участков и цехов, вспомогательных помещений (кладовые, инструментальные и пр.), а также обход служб и интервьюирование ключевых специалистов, задействованных и/или влияющих на ход производства изделия/ий.

Также на данном этапе осуществляется сбор документации необходимой для оценки фактических циклов производства, уровня планирования и организации про-

изводства, детальное обследование «узких мест» и операций, лежащих на «критическом» пути изготовления изделия/ий.

На третьем этапе осуществляется формирование отчёта по результатам технологического обследования.

Данный этап является завершающим. Информация, полученная на первых двух этапах, систематизируется, анализируется, проводятся необходимые расчёты, формируются выводы по текущему состоянию производственной системы исследуемого производства. Третий этап завершается экспертной оценкой производственно-технологической базы, оформлением отчёта по проведённому технологическому обследованию. Разработанный отчёт обсуждается с представителями проверяемого предприя-

тия. Обсуждение может проводиться в формате заседания НТС по решению руководителя технологического обследования, затем итоговый отчёт проходит приёмку у Заказчика технологического обследования.

Результаты технологического обследования служат для промышленных предприятий исходными данными при разработке:

- планов технического перевооружения;
- программ инновационного развития;
- планов стратегических преобразований;
- планов по реконструкции или оптимизации цехов, или производства изделий РКТ в целом;
- плана проведения оценки и мониторинга состояния технологического оборудования современными методами безразборной диагностики;
- технического задания на проектирование оборудования, участков, цехов;
- типовых технологических процессов, основанных на применении оборудования и методов, отвечающих современному мировому уровню;
- технологических мероприятий по повышению эффективности производства;
- технического задания на проектирование транспортно-складских систем;
- мероприятий по расшивке «узких мест» производства;
- а также при проектировании новых цехов.

По мере накопления базы проведённых технологических обследований предприятий РКТ могут разрабатываться предложения по совершенствованию кооперации, специализации, созданию отраслевых центров компетенции и пр.

Методика технологического обследования составлена таким образом, что ей можно пользоваться при оценке состояния и потенциала производственно-технологической базы не только предприятий РКТ, но других отраслей оборонно-промышленного комплекса, что в дальнейшем позволит создать основу для проведения системных преобразований промышленных предприятий.

Данная методика проходит апробацию на базе предприятий РКТ: в 2017 году проведено технологическое обследование нескольких системообразующих предприятиях отрасли, в том числе:

- АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»;
- АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»;
- АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»»;
- АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина».

С учётом полученного практического опыта появляется возможность создания на базе ФГУП «НПО «Техномаш» центра, выступающего интегратором работ с участием головных институтов отрасли, по оценке состояния производственно-технологической базы предприятий. Таким образом, технологическое обследование предприятий РКТ является основным инструментом по формированию промышленной политики отрасли и мониторинга её реализации в рамках Стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.

## ◆ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ

УДК 629.78

*Тюлевин С.В., Космодемьянский Е.В., Семенов Е.П., Вобликов Д.Н., Ткаченко А.С.  
(АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара)*

### **Перспективные проекты и конструкторско-технологические проблемы разработки и изготовления современных средств выведения космических аппаратов**

В статье приведены сведения о созданных и разрабатываемых космических системах дистанционного зондирования Земли и средств выведения. Представлены описания и основные тактико-технические характеристики космических аппаратов дистанционного зондирования Земли разработки АО «РКЦ «Прогресс». Обозначены основные направления развития технологий, позволяющие повысить эффективность производства и конкурентоспособность разрабатываемых изделий.

**Ключевые слова:** космические аппараты, семейство ракет-носителей.

#### **Введение**

Дистанционное наблюдение поверхности Земли из космоса является одним из наиболее динамично разви-

вающихся направлений космических технологий. Это обусловлено широкими возможностями практического применения получаемой информации в самых разных об-

ластях. Использование космических снимков поверхности Земли значительно повышает эффективность работы в области сельского хозяйства, метеорологии, предотвращения чрезвычайных ситуаций и других [1].

Ракетно-космический центр «Прогресс» (АО «РКЦ «Прогресс») является ведущим предприятием и одним из мировых лидеров в области создания и эксплуатации ракет-носителей среднего класса, космических комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и автоматических космических аппаратов (КА) прикладного назначения.

Одним из значимых этапов развития средств ДЗЗ разработки АО «РКЦ «Прогресс» стал запуск и успешная эксплуатация КА «Ресурс-ДК1», который более девяти лет давал целевую и научную информацию. Этот аппарат стал своеобразной космической лабораторией по совершенствованию систем управления всех КА, находящихся в разработке на предприятии.

Гамма перспективных технологий:

- сварка трением с перемешиванием (в том числе для сварки продольных, кольцевых швов баков и днищ);
- производство вафельных обечасок, основанное на механическом фрезеровании ячеек на станках с программным управлением;
- получение деталей сложной пространственной формы (кронштейны, корпуса, фитинги и т.д.) методом селективного лазерного и электронно-лучевого спекания (СЛС);
- получение элементов трубопроводов больших размеров методом газопорошковой наплавки;
- совершенствование раскройных, гибочных технологий на основе современных просечных и гибочных комплексов;
- магнитно-импульсная штамповка сильфонных конструкций, создание более мощных видов магнитно-импульсных установок;
- механообработка на многокоординатных обрабатывающих центрах с применением 3D-моделей деталей;
- совершенствование технологии механообработки нежестких конструкций в целях доведения до заданных требований по точности;
- автоматизация техпроцессов термической обработки;
- неразрушающий контроль (определение макро- и микроструктуры сплавов, количественных анализ малых примесей и т.д.) в целях обеспечения повышенных требований к входному контролю материалов;
- автоматизированный ультразвуковой контроль листов и плит для изготовления оболочек изделий;
- создание технологии и оборудования автоматизированного неразрушающего контроля неприклея компо-

зиционных трёхслойных конструкций с сотовым наполнителем;

- производство приборно-кабельной продукции на основе новых импортных электрорадиоизделий, миниатюрных соединителей, проводов с сечением до 0,05 мм, с облегчённой оплёткой;
- обмер крупногабаритных агрегатов изделий с применением лазерных средств и современных контрольно-измерительных машин. Обмер изделий с применением оптических средств с обработкой результатов на персональном компьютере;
- технология и оборудование криогенных испытаний арматуры и шаробаллонов (жидким азотом);
- криогенно-статические испытания элементов баков ракет-носителей;
- модернизация автоматизированных стендов для проведения испытаний на прочность сборок изделий;
- изготовление крупногабаритных транспортных контейнеров, проведение регламентных и восстановительных работ [1].

### Заключение

При разработке высокотехнологичной наукоёмкой продукции необходимо опираться на передовые достижения в области производственных технологий и материаловедения. Создание космической техники является одним из наиболее востребованных направлений для отработки и применения перспективных и узкоспециализированных технологических процессов. Их внедрение позволяет обеспечивать требуемую надёжность, качество и высокие тактико-технические характеристики разрабатываемых изделий.

### Список литературы

1. Кирилин А.Н. Основы взаимодействия АО «РКЦ «Прогресс» с головными институтами при разработке высокотехнологичной продукции [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, С.В. Тюлевин, А.Д. Сторож, Е.В. Космодемьянский, Е.П. Семенов, С.М. Микушкина, С.В. Максимов // Технология машиностроения. 2016. №1. С. 50–59.
2. Кирилин А.Н. Проектирование, динамика и устойчивость движения ракет-носителей: Методы, модели, алгоритмы, программы в среде MathCad [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Сологуб. М: Машиностроение, 2013. 296 с.
3. Кирилин А.Н. Ракеты-носители и космические аппараты ГНП РКЦ «ЦСКБ–Прогресс» [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов // Полёт. 2007, №8. С. 45–52.
4. Козлов Д.И. Конструирование автоматических космических аппаратов [Текст] / Д.И. Козлов. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.

## ◆ ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.777

Прусаков М.А.

### Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы

Статья посвящена развитию технологии глубокой вытяжки тонкостенной полусферы. Разработана математическая модель нестационарного процесса глубокой вытяжки тонкостенной полусферы жёстким пуансоном. Используется жёсткопластическая модель материала заготовки при условии пластичности по теории плоского напряжённого состояния по Соколовскому. Упругое изменение формы заготовки учитывается малой деформацией, при которой начинается пластическое формообразование. Рассматривается эффект разгрузки деформируемой заготовки в процессе перемещения пуансона. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными вытяжки полусферы из коррозионностойкой стали.

**Ключевые слова:** глубокая вытяжка, полусфера, жесткопластическое тело, пластическое упрочнение, изменение толщины, внеконтактная зона, математическая модель, алгоритм вычисления, коррозионностойкая сталь.

Тонкостенные сферические оболочки, обладающие оптимальным отношением полезного объёма к весу, применяются в аэрокосмическом, транспортном и других отраслях современного машиностроения [1, 2]. Вытяжка полусферы из плоского листа является одним из эффективных способов получения тонкостенной сферической оболочки.

Реже применяют процесс глубокой вытяжки жёстким пуансоном без нагрева листовой заготовки. Связано это с тем, что традиционный метод оценки возможности формоизменения по предельному коэффициенту вытяжки, как при вытяжке цилиндрической оболочки, не применим для процесса глубокой вытяжки полусферы, так как на начальной стадии вытяжки сферическим пуансоном фактический диаметр контакта пуансона с заготовкой существенно меньше диаметра сферы [3–6].

На практике данные детали изготавливают многопереходной вытяжкой ступенчатого полуфабриката с последующей обтяжкой жёстким инструментом и калибровкой на гидравлических прессах или на установках для беспрессовой штамповки с использованием импульсных энергоносителей. В процессе формоизменения между переходами вытяжки проводят термическую обработку полуфабриката для снятия упрочнения металла, что делает процесс трудоёмким и затратным [4, 6].

В настоящее время при разработке технологического процесса глубокой вытяжки тонкостенной полусферы жёстким пуансоном используют эмпирические зависимости из справочных данных, а также результаты теоретических исследований, в которых не учитывается нестационарность процесса формоизменения с учётом упрочнения, изменения толщины и формы внеконтактной зоны оболочки.

Таким образом, развитие теории и технологии глубокой вытяжки тонкостенной полусферы жёстким пуансоном является актуальной задачей.

Теоретические исследования процесса глубокой вытяжки тонкостенной полусферы жёстким пуансоном выполнены на основе математической теории пластичности при плоском напряжённом состоянии по Соко-

ловскому [7] и мембранной теории жёсткопластической оболочки при условии пластичности с учётом упрочнения материала, изменения толщины стенки детали и с использованием алгоритмов связи начальных и текущих координат [8].

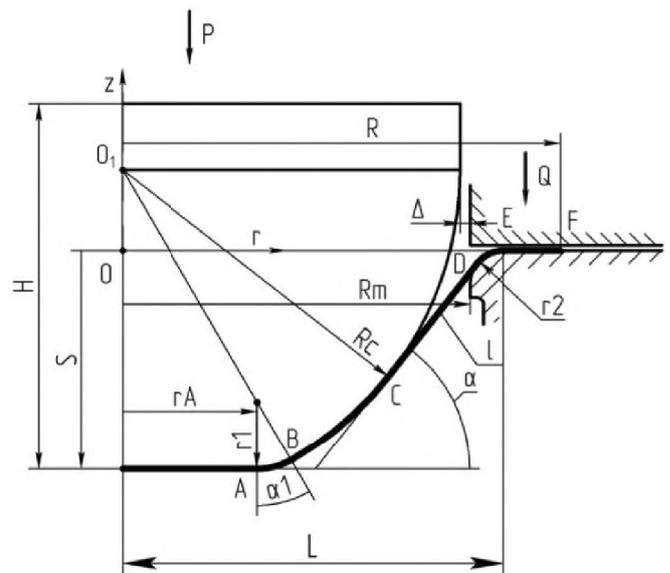


Рис. 1. Расчётная схема процесса

Расчётная схема процесса глубокой вытяжки полусферы с прижимом фланца из плоской заготовки радиусом  $R_0$  и толщиной  $h_0$  показана на рис. 1. Представляет собой участки плоского торца  $OA$ , радиуса закругления пуансона  $AB$ , сферы  $BC$ , внеконтактной зоны  $CD$ , радиуса матрицы  $DE$  и плоского фланца  $EF$ . Для получения относительной размерности радиус сферы  $R_c$  выбран как характерный размер для выражения длин, а начальное напряжение текучести  $\sigma_0$  – для напряжений. Малый радиус  $r_A$  плоского торца пуансона необходим для исключения сингулярности напряжения в полюсе оболочки. В случае вытяжки полусферы без плоского торца, радиус  $r_A \rightarrow 0$ , а радиус закругления пуансона  $r_1 \rightarrow R_c$ . Коэффициенты



трения на контактных поверхностях пуансона и матрицы различны –  $f_1$  и  $f_2$ , соответственно.

При конической аппроксимации внеконтактной зоны перемещение пуансона  $S$  и длина  $l$  определяются параметрическими зависимостями (1) от угла наклона  $\alpha$  конической образующей. Предельный угол  $\alpha^*$  определяется конечным перемещением пуансона  $s^*$  относительно начальной формы заготовки. Зависимости представлены в работах [9, 10].

Так как теоретический анализ процесса глубокой вытяжки проводится для упрочняющегося жёсткопластического тела, то начальная форма заготовки изменится упруго, что означает появление контакта с криволинейными рабочими поверхностями пуансона и матрицы. В этом случае начало жёсткопластического деформирования задаётся малой пластической деформацией кромки плоской заготовки  $e_0 = \ln(R_0/R_F)$ , при которой пластическая деформация распространяется по всей заготовке и начинается пластическое течение плоского фланца в проём матрицы. По условию сохранения объёма при постоянной толщине  $h_0$  получена зависимость для малого угла  $\alpha_0$  от заданной деформации  $e_0$ :

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{R_0^2 [1 - \exp(-2e_0)]}{2aI} \\ R_F = R_0 \exp(-e_0) \end{cases} \quad (1)$$

Дифференциальные уравнения равновесия участков тонкостенной оболочки с учётом параметрической формы напряжений по Соколовскому составлены для параметра  $\omega$ , характеризующего напряжённое состояние, и представлены в работе [9].

Для вычисления напряжённо-деформированного состояния стенки вдоль образующей детали дифференциальные уравнения равновесия интегрируются численным методом Рунге-Кутты второго порядка при условии пластичности Мизеса. На участке двухосного растяжения (контакт заготовки с криволинейной поверхностью пуансона) вместо условия пластичности Мизеса применяется условие пластичности Треска, т.к. при достижении максимума по главному напряжению при вычислении приращений деформаций происходит деление на «ноль».

Интегрирование дифференциальных уравнений происходит от кромки фланца к плоскому торцу с передачей вычисленного значения параметра  $\omega$  от участка к участку в качестве начального условия.

Далее происходит вычисление приращения пластических деформаций в окружном направлении  $de_\theta$ , в меридиональном направлении  $de_\phi$ , по толщине  $de_h$ , позволяющие определить изменение толщины стенки (2) вдоль образующей детали, и приращение накопленной пластической деформации  $de_p$ , позволяющая определить изменение напряжения текучести (2) для учёта упрочнения материала заготовки по кривой упрочнения. Зависимо-

сти по определению приращения деформаций представлены в работе [9].

$$\begin{cases} h_{i+1} = h_i(1 + de_h) \\ e_{p_{i+1}} = e_{p_i} + de_p \\ \sigma_s = \sigma_0(1 + Ce_{p_{i+1}}^n) \end{cases} \quad (2)$$

Сила вытяжки  $P(S)$  в зависимости от перемещения пуансона вычисляется по растягивающему напряжению  $\sigma_\phi$  и толщине  $h$  в точке С перехода образующей на контакт с пуансоном:

$$P(S) = 2\pi h r_C \sigma_\phi \sin \alpha, \quad (3)$$

где:  $l = 2\pi r_C$  – длина дуги контактного участка заготовки с пуансоном в точке С,

$T_C = h\sigma_\phi$  – сила натяжения в стенке детали в точке С.

В начале процесса максимальные напряжения  $\sigma_\phi$  возникают при  $\omega \rightarrow 0$  при двухосном растяжении и пластической деформации, приводящей к быстрому увеличению напряжения текучести  $\sigma_s$  вследствие упрочнения при уменьшении толщины  $h$ . Снижение силы натяжения  $T_C$  при увеличении перемещения и контактной границы на пуансоне рассматривалось как признак разгрузки деформируемой заготовки, при которой приращение пластической деформации на пуансоне не происходит при дальнейшем увеличении границы контакта  $ABC$  без изменения толщины. Следовательно, не происходит резкого утонения в полюсе детали.

Форма внеконтактного конического участка образующей  $CD$  с углом наклона  $\alpha$  при пластическом напряжённом состоянии  $\sigma_\theta \neq 0$  искривляется вследствие равновесия материального элемента оболочки по нормали к образующей. Зависимость, описывающая криволинейную форму участка, представлена в работе [9].

Для численного моделирования нестационарного процесса глубокой вытяжки тонкостенной полусферы разработана FORTRAN-программа на основе приведённой математической модели. Алгоритм вычислительной программы представлен на рис. 2.

Численные результаты моделирования глубокой вытяжки тонкостенной полусферы радиусом  $R_{сф} = 50$  мм из листа коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т номинальной толщиной 1 мм представлены в [9].

Для экспериментального подтверждения адекватности математической модели процесса спроектирована и изготовлена штамповая оснастка [11]. В комплект оснастки входят два типа пуансонов, представленных в табл. 1. Вытяжка проводилась в лаборатории исследования свойств материалов ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин» на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5989 силой 600 кН.

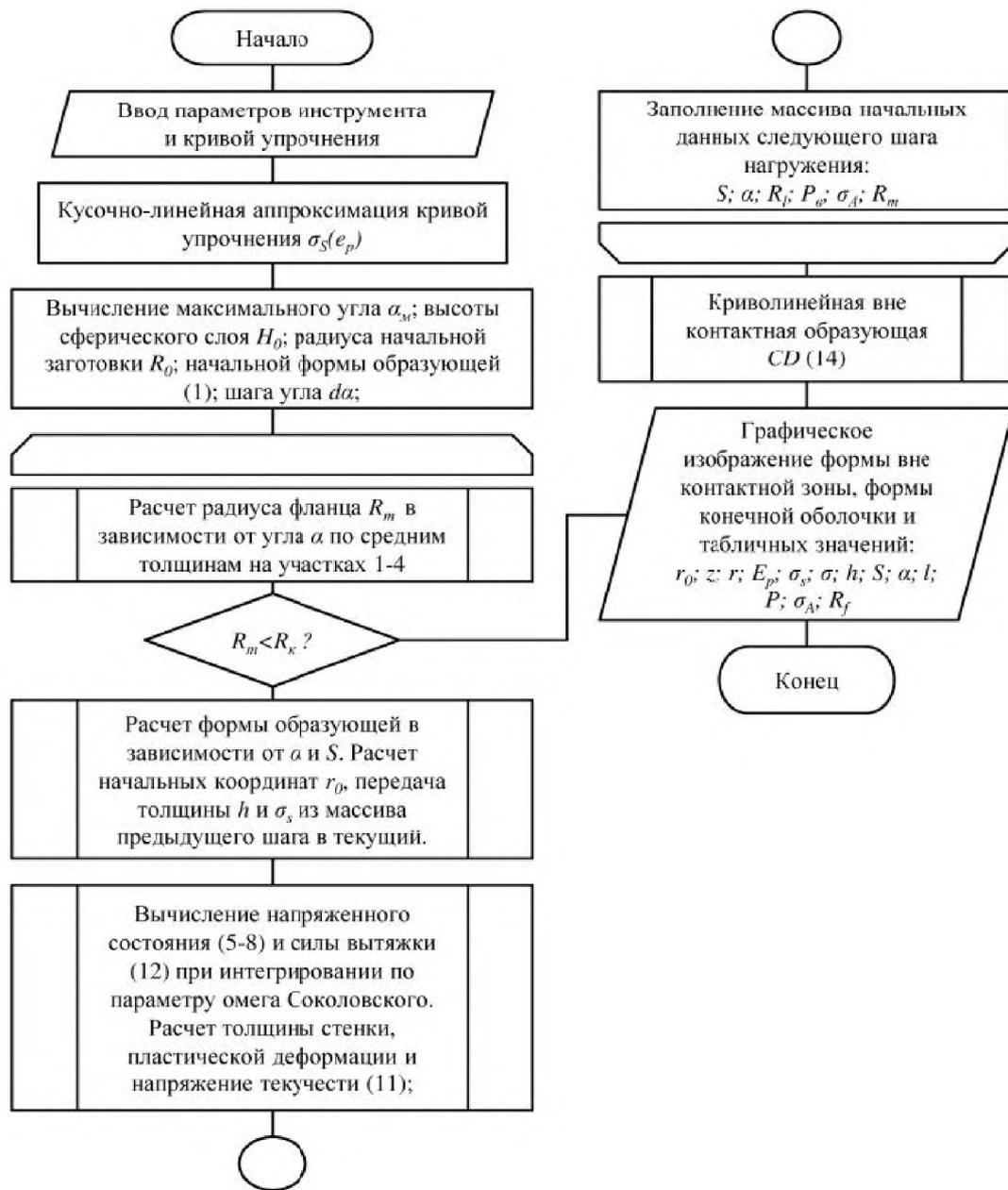
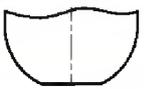


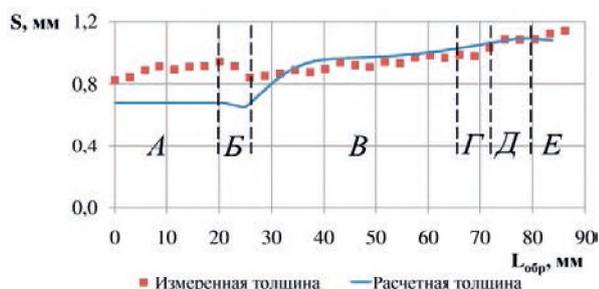
Рис. 2. Алгоритм вычислительной программы

Таблица 1.

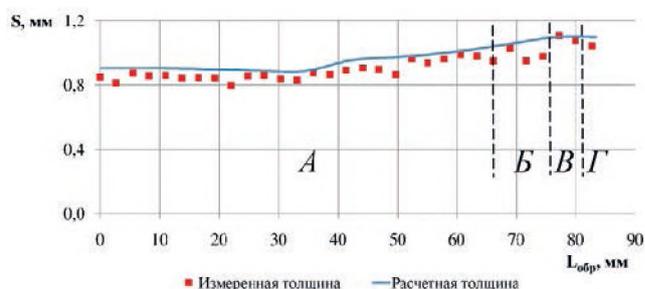
Типы пуансонов		
№ п/п	Схема	Параметры
1		Пуансон с радиусом закругления донной и сферической частей профиля. Радиус плоского дна $r_A = 20$ мм, радиус закругления $r_l = 10$ мм, радиус сферы $R = 50$ мм
2		Пуансон сферический с радиусом сферы $R = 50$ мм

На рис. 3 представлены расчётные и измеренные значения толщины стенки вдоль образующей в соответствующих зонах:

- для рис. 3а: А – плоского дна, Б – радиуса закругления пуансона, В – сферическая, Г – внеконтактная, Д – радиуса закругления матрицы, Е – фланца;
- для рис. 3б: А – сферическая, Б – внеконтактная, В – радиуса закругления матрицы, Г – фланца.



а) пуансон с радиусом закругления



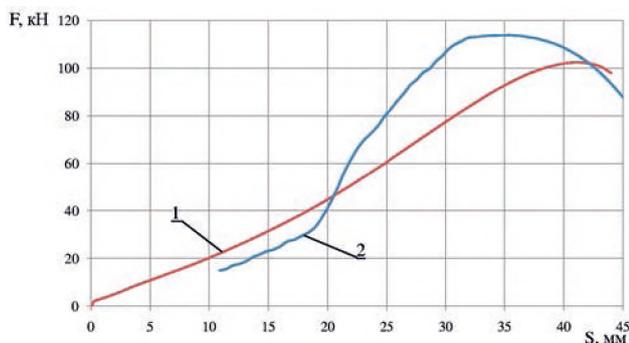
б) сферический пуансон

Рис. 3. Расчётные и измеренные значения толщины стенки

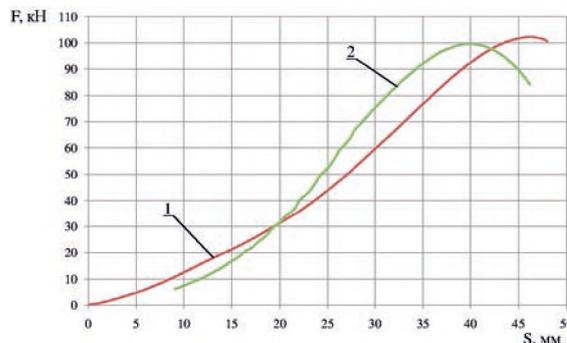
Максимальное расхождение измеренной и расчётной толщины наблюдается на участке радиуса закругления для пуансона №1 и составляет 28%. На остальной части образующей детали расчётные значения практически совпадают с измеренной толщиной. Для пуансона №2 графики толщин практически совпадают

на всех участках, максимальное расхождение наблюдается в зоне радиуса закругления матрицы и составляет 12%.

На рис. 4 приведены графики измеренных (1) и расчётных (2) значений силы вытяжки  $F$  в зависимости от перемещения пуансона  $S$ .



а) пуансон с радиусом закругления



б) сферический пуансон

Рис. 4. Измеренные (1) и расчётные (2) значения силы вытяжки

Максимальные расчётные значения силы вытяжки близки к экспериментальным значениям с точностью аппроксимации экспериментальной кривой упрочнения. Смещение расчётной максимальной силы вытяжки по сравнению с экспериментом можно объяснить превышением толщины детали вдоль образующей.

### Выводы

1. Разработана математическая модель нестационарного процесса глубокой вытяжки тонкостенной полусферы, учитывающая упрочнение материала заготовки и изменение толщины вдоль образующей детали.

2. На основе математической модели разработана прикладная программа для ЭВМ, позволяющая в процессе формообразования детали определить её напряжённо-деформированное состояние, силу вытяжки в зависимости от перемещения, кинематику течения металла и конечную форму. Адекватность математической модели подтверждена результатами эксперимента.

### Список литературы

1. Тонкостенные оболочечные конструкции / пер. с англ.; под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1980. 608 с.

2. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. и др. Технология самолетостроения. М.: Машиностроение, 1982. 552 с.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
4. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
5. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с.
6. Мельников Э.Л. Справочник по холодной штамповке оболочковых деталей // 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 288 с., ил.
7. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высш. шк., 1969. 608 с.
8. Napershin R.I. Applied problems of plasticity. – М.: FSBEI HE «MSTU «STANKIN», 2016. 310 p.: figs., index.
9. Непершин Р.И., Прусаков М.А. Моделирование глубокой вытяжки тонкостенной полусферы // Вестник МГТУ «Станкин». 2016. № 1(36). С. 14–20.
10. Прусаков М.А. Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы. Пром-Инжиниринг: труды II МНТК. Челябинск: ЮУрГУ, 2016. С. 94–98.
11. Прусаков М.А. Глубокая вытяжка тонкостенной полусферы пуансонами с различным профилем // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. №7. С. 20–23.

УДК 621.774.35 + 621.184.64

*Вайцехович С.М., Бараев А.В.*

### Паровые водотрубные котлоагрегаты с использованием спирально-профильных труб для морских надводных и подводных судов

Предложены пути модернизации секционных кожухотрубных паровых, водо-водяных подогревателей спирально-профильными теплообменными трубами с пассивными интенсификаторами теплоотдачи.

**Ключевые слова:** спирально-профильная труба, интенсификатор, теплообмен, накипеобразования, паровая смесь, котёл.

На судах с паровыми поршневыми или паротурбинными силовыми установками используют энергию пара для работы главных машин, отопления и обеспечения технологических процессов. Создатель парового котла – французский физик Д. Папен (1680). На первых паровых котлах давление пара составляло (0,3–0,4) атм, через 100 лет – 20–25 атм.

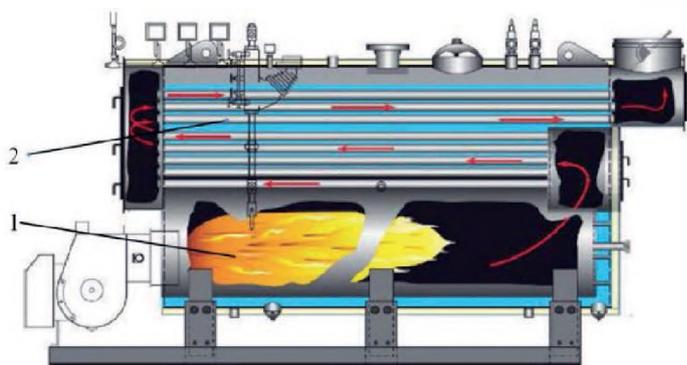
По типу омывания газами поверхности нагрева труб судовые котлы подразделяются на две основные группы: газотрубные и водотрубные. В газотрубном котле горячие газы, как основной теплоноситель, движутся внутри

труб, а вода окружает их снаружи. В водотрубном котле – наоборот: вода и паровая смесь находятся внутри труб, а горячие газы омывают их снаружи. Кроме двух основных групп котлов имеются промежуточные группы с различным расположением теплоносителя.

Газотрубные и газодотрубные котлы чаще встречаются на судах зарубежной постройки. В последние годы преимущественное распространение стали получать водотрубные котлы. На современных судах применяются, в основном, водотрубные котлы (рис. 1 а, б).



а)



б)

Рис. 1. Паровой котёл парохода «Н.В. Гоголь»: а) внешний вид парового котла; б) конструкция судового парового котла: 1 – камера сгорания газа; 2 – жаропрочные трубы



Поверхность нагрева водотрубных котлов состоит из труб, заполненных водой и омываемых снаружи горячими газами, получаемыми в результате горения топлива.

Основным недостатком в работе паровых котлов являются накипеобразования на поверхности нагрева в трубном объёме, что приводит к послойному нарастанию солей. Качественные показатели воды в процессе работы ухудшаются и для продления срока службы тепловых труб в котел вносится большое количество химических и механических примесей, которые накапливаясь, влияют на экологию и уменьшают КПД котла. Солеотложение в тепловых трубах является главным недостатком работоспособности паровых котлов.

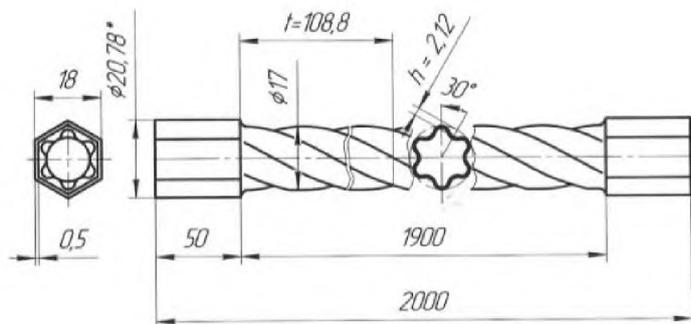
Самый простой и экономичный вариант перевооружения судовых котлов состоит в замене гладких труб (или труб, профилированных накаткой) на трубы спирально-профильные при сохранении остальных конструктивных элементов (трубной доски, калачей и переходников) без изменения, что позволит повысить теплопередачу котла в два раза. Замена профилированных труб, полученных методом накатки на спирально-профильные трубы (СПТ) позволит повысить теплопередачу в 1,56 раза и ослабить на 36% мощность водяного напора, что приведёт к экономии электроэнергии. Изготовление новых котлов с СПТ вместо гладких труб при сохранении постоянными их тепловых парамет-

тров позволит уменьшить занимаемые ими площади в полтора раза [1, 2].

В 2002 году на Всероссийской конференции «Закрутка потока для повышения эффективности в теплообменниках» под эгидой Объединённого института высоких температур при Российской Академии Наук СПТ отнесли к классу «spirally fluted tubes SFT» – дискретно шероховатых каналов с винтовой симметрией и причислили их к пассивным интенсификаторам теплообмена третьего поколения, поверхность которых интенсифицируют теплообмен для ламинарных потоков до 10 раз при 2–3 разовом росте гидравлического сопротивления.

Сформированная геометрия поверхности СПТ позволяет разделить общий поток на ряд дискретных ручьёв и закрутить их, что повышает коэффициент теплопередачи. Разработанное оборудование и технология [3, 4] позволяют на исходной гладкой трубной заготовке выполнить ряд предварительных операций по нанесению на ней определённой гравюры. Например, нанесение неглубокого спирального рельефа либо спирально-крестового рельефа (трубы Kreuz-Drall-Rohr) обеспечит пристенную турбулизацию полученных дискретных потоков, исходя из числа Рейнольдс отдельных дискретных потоков, а не потока в целом.

На рис. 2 а, б представлены шестизаходные СПТ с шестигранными законцовками.



а)



б)

Рис. 2 – СПТ с шестигранными законцовками:  
а) чертёж шестизаходной СПТ; б) внешний вид СПТ

Шестигранные законцовки позволяют группировать трубы в пучок без использования трубной доски, что существенно снижает гидравлическое сопротивление на входе в пучок труб.

Переход на СПТ даёт снижение массы водотрубных котлов от 2–10 раз и уменьшение занимаемой площади в 4–9 раз.

Для того, чтобы исследовать теплофизические характеристики СПТ, необходимо идентифицировать геометрию труб. Предложены следующие расчётные геометрические параметры: диаметр исходной трубы –  $D_0$  [мм]; диаметр описанной окружности после деформации –  $D_a$  [мм]; диаметр вписанной окружности после деформации –  $D_b$  [мм]; толщина стенки трубы  $s$  [мм]; шаг между соседними гофрами –  $k$  [мм]; угол закрутки относительно оси трубы –  $\theta$  [градусы]; глубина гофры –  $c$ , вычисляется как  $D_a - (D_b - s)$ .

Гидравлический диаметр  $D_h$  вычисляется обычным способом. Вместо шага между соседними гофрами при заданном угле закрутки можно использовать эквивалентную характеристику – количество гофров –  $n$  [шт.], показывающую плотность выступов – впадин на единицу длины трубы.

Все перечисленные выше геометрические параметры характеризуют геометрию СПТ. В теоретических и экспериментальных исследованиях теплообмена и гидравли-



ческого сопротивления СПТ следует рассчитывать функциональные зависимости для учёта гидродинамических и тепловых эффектов.

Число Нуссельта ( $N_u$ ), характеризующее теплоотдачу и гидравлическое сопротивление ( $\xi$ ), является функцией числа Рейнольдса ( $R_e$ ), Прантля ( $P_r$ ), глубины гофра ( $c^*$ ), шага между гофрами ( $k^*$ ), угла закрутки ( $\theta^*$ ) [5]:

$$N_u = f_1(R_e, P_r, c^*, k^*, \theta^*)$$

$$\xi = f_2(R_e, P_r, c^*, k^*, \theta^*),$$

где безразмерные величины  $c^* = \frac{c}{D_a}$ ;  $k^* = \frac{k}{D_a}$ ; и  $\theta^* = \frac{\theta}{90^\circ}$ .

Теоретический анализ определения гидро- и газодинамических параметров процесса, а также теплотехнических характеристик, проводится как для ламинарного, так и для турбулентного течений. Уравнение Навье-Стокса – система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости, решается с помощью численных значений коэффициентов ряда рядов Фурье, при этом выражение скорости течения жидкости должно удовлетворять пограничным условиям – условию прилипания жидкости на границе профильной части трубы.

#### Выводы

Завихрение потока теплоносителя (интенсивное перемешивание всех слоев теплоносителя по сечению как наружного, так и внутреннего потока) приводит к повышению эффективности переноса тепла в несколько раз в зависимости от теплогидравлических условий теплообменного аппарата.

Геометрическая форма гофрированной трубы ведёт к увеличению пути прохождения теплоносителя, и за счет этого возрастает время нахождения теплоносителя в аппарате, и, соответственно, повышается эффективность теплообмена.

Увеличение площади теплообменной поверхности на единицу объёма теплообменника позволяет уменьшить размеры аппарата при той же тепловой мощности или увеличить тепловую мощность при тех же размерах.

#### Список литературы:

1. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных жидкостей // М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Расчёт профиля скорости при течении нелинейной вязкоупругой жидкости в каналах с винтовой накаткой // ИФЖ. 1992. Т.62. №3.
3. Вайцехович С.М., Лебедев А.Н. и др. Способ изготовления спирально-профильных труб с полыми винтовыми гофрами. Патент 2331492, приоритет от 8 апреля 2006 г.
4. Вайцехович С.М., Лебедев А.Н. и др. Способ изготовления спирально-профильных труб. Патент 2331493, приоритет от 8 апреля 2006 г.
5. Лебедев В.Н., Лебедев А.Н., Мишулин А.А., Вайцехович С.М., Овчинникова Г.А. Энергосбережение в энерготехнике и коммунальном хозяйстве. Материалы МНПК Рациональное природопользование: ресурсо- и энергосберегающие технологии и их метрологическое обеспечение. Петрозаводск. Республика Карелия. Москва. 2004.

УДК 621.777

*Овечкин Л.М., Кривенко Г.Г.*

### Анализ процесса интенсивной пластической деформации для получения ультрамелкозернистых структур

Представлены результаты компьютерного моделирования процесса равноканального углового прессования с различными вариантами сочетаний радиусов сопряжения каналов. Получены зависимости силовых характеристик процесса от радиусов сопряжения каналов.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, течение металла, сдвиговая деформация, силы прессования, угол пересечения каналов, компьютерное моделирование.

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из конкурентоспособных способов получения заготовок из сплавов на основе алюминия, меди, а также труднодеформируемых сплавов с ультрамелкозернистой структурой и высоким комплексом механических свойств и основан на представлении об интенсивной пластической деформации (ИПД). Данная технология позволит получать качественные заготовки для изготовления деталей точной механики изделий ракетно-космической техники (РКТ).

В технологии РКУП заготовка циклически продавливается через пересекающиеся каналы равного поперечного сечения. При этом достигается значительная величина деформаций (логарифмическая деформация  $\epsilon = 4 \dots 7$ ) при относительно низких температурах (ниже  $0,3-0,4 T_{\text{плавления}}$ ) в условиях высоких приложенных давлений. При этом пластичные материалы возможно подвергать обработке без нагрева, а труднодеформируемые – с нагревом в указанном выше интервале температур.



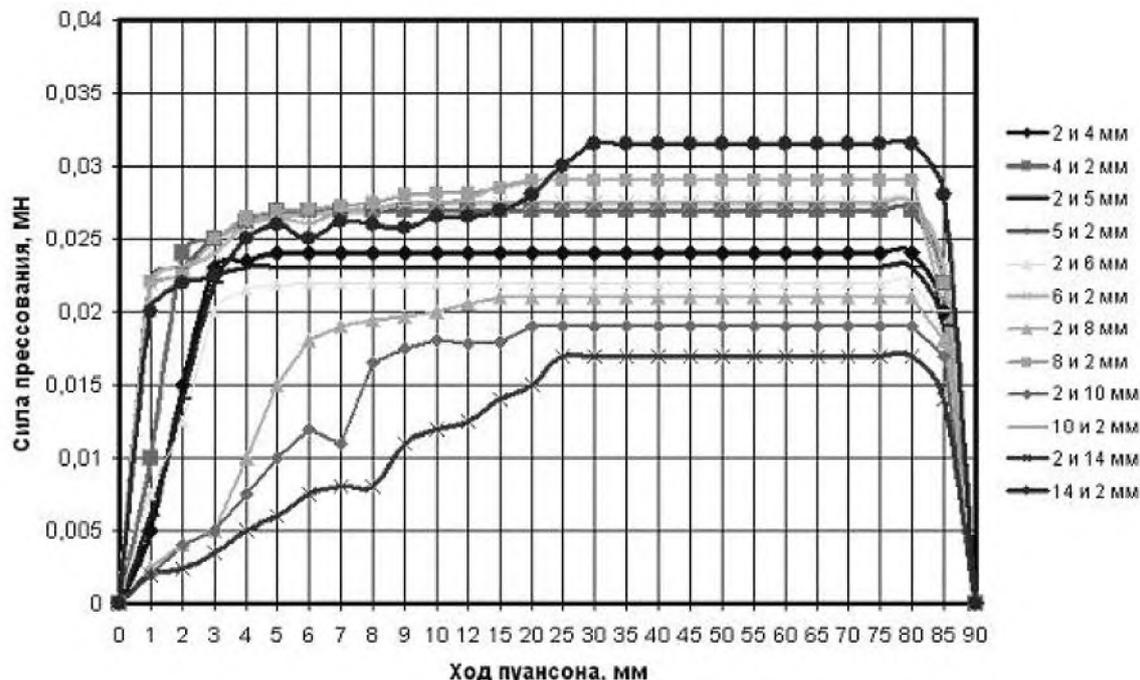


Рис. 2. Зависимость технологических сил прессования от хода пуансона при различных значениях радиусов сопряжения каналов

Из приведенной на рис. 2 зависимости видно, что при увеличении одного из радиусов сопряжения свыше 5 мм наблюдается двухступенчатое увеличение технологической силы прессования, при этом механизм деформации заготовки отличен от схемы простого сдвига и представляет собой изгиб заготовки по наружному радиусу канала.

При анализе результатов моделирования отмечается целесообразность выполнения в канале матрицы внешнего и внутреннего радиусов сопряжения каналов 2 мм и 5 мм соответственно, что необходимо учитывать при проектировании экспериментальной оснастки. Данное решение, учитывая [2], позволит обеспечить беспрепятственное течение металла заготовки в канале матрицы, а также снизит вероятность возникновения поверхностных дефектов. При геометрии канала матрицы с такими параметрами, наблюдается однократный характер повышения технологической силы прессования, а также минимальное искажение выходного торца заготовки, что позволяет повысить коэффициент использования металла заготовки. Для реализации различных схем РКУП необходим экспериментальный лабораторный модульный штамп с возможностью быстрого изменения его конфигурации и технологических параметров, спроектированный с учетом данных, полученных при компьютерном моделировании [3]. Также, принимая во внимание возникаемый в процессе эксплуатации износ штамповых элементов,

данное технологическое решение позволит проводить быструю замену исполнительных элементов штампа.

#### Выводы

1. Получены зависимости для определения силовых и деформационных параметров процесса РКУП.
2. По результатам компьютерного моделирования установлены значения радиусов сопряжения каналов при которых изменяется механизм деформации. Для реализации сдвиговых деформаций радиус сопряжения каналов не должен превышать 5 мм.

#### Список литературы

1. Шейнман Е.М. Прессование через колесообразный канал. // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. №6. С. 5–8.
2. Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Климов В.Н., Сосенушкин А.Е., Сапронов И.Ю. Исследование кинематики течения металла при равноканальном угловом прессовании и ее влияние на эволюцию микроструктуры и свойств. // Кузнечно-штамповочное производство. 2012. №11. С.19–22.
3. Овечкин Л.М., Кривенко Г.Г. Технологические особенности процесса равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых структур. Новые технологии. Том 2. Материалы X Всероссийской конференции. М.:РАН, 2013. С. 10–20.

УДК 621.7.043

*Харсеев В.Е., Кривенко Г.Г., Миронов В.В., Овечкин Л.М.*

### Инновационное решение изготовления осесимметричных оболочковых деталей

В данной работе в качестве инновационного решения для изготовления осесимметричных оболочковых деталей рассматривается применение технологии ротационной вытяжки; описаны ее преимущества как в техническом, так и экономическом отношении. Также кратко представлены возможности ФГУП «НПО «Техномаш» в области технологии ротационной вытяжки.

**Ключевые слова:** ротационная вытяжка, раскатка, оболочковые детали, изготовление, инновационное решение.

Организация выпуска товаров в условиях рыночной экономики требует постоянного поиска способов сокращения производственных издержек и, как результат, снижения себестоимости изготавливаемой продукции в целях повышения её конкурентоспособности. Вариантом достижения упомянутых результатов является замена традиционных методов обработки инновационными решениями. Одним из наиболее перспективных инновационных решений в области заготовительного производства осесимметричных оболочковых деталей является применение технологии ротационной вытяжки.

Ротационная вытяжка – это высокоэффективный прогрессивный процесс получения детали последовательным пластическим формоизменением плоских или полых вращающихся заготовок одним или несколькими давящими инструментами, перемещающимися по заданной траектории относительно оправы.

В техническом отношении ротационная вытяжка позволяет [1]:

- получать полые осесимметричные детали весьма сложных форм, изготовление которых другими методами затруднено или невозможно;

- создавать лёгкие, прочные и жесткие конструкции деталей при небольшом расходе металла;
- получать детали с высокой точностью и малой шероховатостью поверхности;
- минимизировать число операций при изготовлении полых конических, сферических, параболических и других сложных деталей;
- получать полые осесимметричные детали с заданной переменной толщиной стенок или без утонения с одновременным улучшением механических свойств обрабатываемого материала;
- обеспечить небольшие усилия при формообразовании, а также снизить размеры и мощность обрабатывающего оборудования по сравнению с прессами;
- выполнять на одном и том же оборудовании и с одной установки основные и доделочные операции;
- получать детали из труднодеформируемых и малопластичных материалов;
- вести комбинированную обработку деталей из литовой, штампованной, кованой, литой или сварной заготовки.

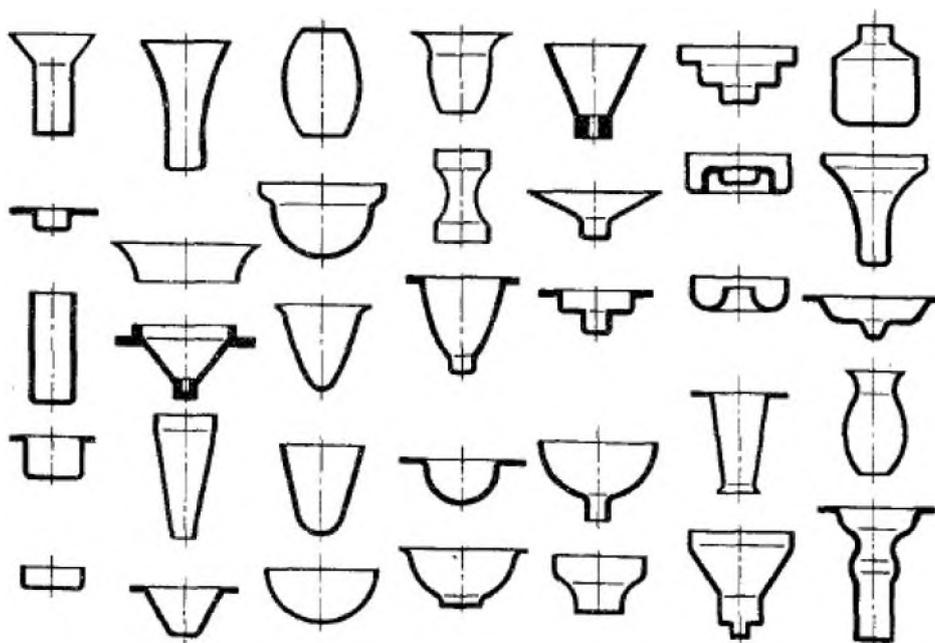


Рис. 1. Детали, изготовленные ротационной вытяжкой [1]

В экономическом отношении для ротационной вытяжки характерно следующее [1]:

- высокая стойкость, простота, малая масса и низкая стоимость приспособлений и инструмента;
- высокая экономическая эффективность при изготовлении деталей малыми сериями;
- малые сроки и небольшие затраты на подготовку производства;
- сокращение цикла обработки детали;
- универсальность оборудования, инструмента и быстрая переналадка на выпуск новых видов продукции;
- исключение необходимости изготовления обрезаемых и вырубных штампов;
- достижение экономии металла при изготовлении более простого давяльного оснащения, а также за счёт рационализации технологии изготовления.

Методом ротационной вытяжки можно изготавливать полые осесимметричные детали, имеющие форму, аналогичную представленным на рис. 1.

Широкое распространение ротационной вытяжки в промышленности сдерживает недостаточная изученность процесса, сложность расчёта режимов формообразования и, как следствие, необходимость наличия высококвалифи-

цированных кадров, обладающих необходимыми специфическими знаниями и опытом. ФГУП «НПО «Техномаш» занимается различными работами в области ротационной вытяжки уже более 40 лет. За это время были спроектированы и изготовлены несколько единиц универсального оборудования для ротационной вытяжки горизонтального и вертикального исполнения с различными системами управления, в том числе числовой, позволяющие изготавливать методом наружной и внутренней раскатки детали диаметром до 3200 мм; отработаны и внедрены технологии ротационной вытяжки ряда деталей из сталей, титановых и алюминиевых сплавов для предприятий как ракетно-космической, так и других отраслей промышленности; накоплен уникальный научно-производственный опыт.

Также ФГУП «НПО «Техномаш» оказывает услуги по ротационной вытяжке оболочковых деталей. В качестве примера на рис. 2 представлены изделия, изготавливаемые в настоящее время. Действующий станочный парк оборудования для ротационной вытяжки включает в себя универсальные давяльно-раскатный стан с числовым программным управлением СРВ-1200 и токарно-давяльный станок КЖ-9901, позволяющие изготавливать детали со следующими геометрическими параметрами:

– максимальный диаметр обрабатываемой детали, мм:	1200;
– максимальная длина обрабатываемой детали, мм:	1800;
– максимальная толщина заготовки, мм:	12;
– размерная точность толщины изготавливаемой детали, мм:	$\pm 0,1$ .



Рис. 2. Детали, изготовленные ротационной вытяжкой [1]

#### Список литературы

Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н.И. Могильный. М.: Машиностроение; 1983. 192 с.

УДК 621.073.7

*Бецеков В.Г., Кулик В.И., Королёв А.Н., Щегольсков В.П., Харсеев В.Е., Кондауров А.Е., Лесных Г.В., Сиякова Т.И., Вайцехович С.М., Прусаков М.А.*

### Исследование формообразования полусфер шаробаллонов сферодвижным деформированием

Статья посвящена альтернативной технологии изготовления полусфер шаробаллонов из никелевых сплавов сферодвижным формообразованием, обеспечивающей снижение энергоёмкости процесса формовки и одновременно повышение технологической пластичности материала в течение всего процесса деформирования.

**Ключевые слова:** сферодвижное формообразование, волновая природа пластичности, эффект Баушингера, спиральная морфология волокнистой структуры материала.

Шаробаллоны как баки под топливо и окислитель являются обязательными деталями изделий ракетно-космической техники (РКТ).

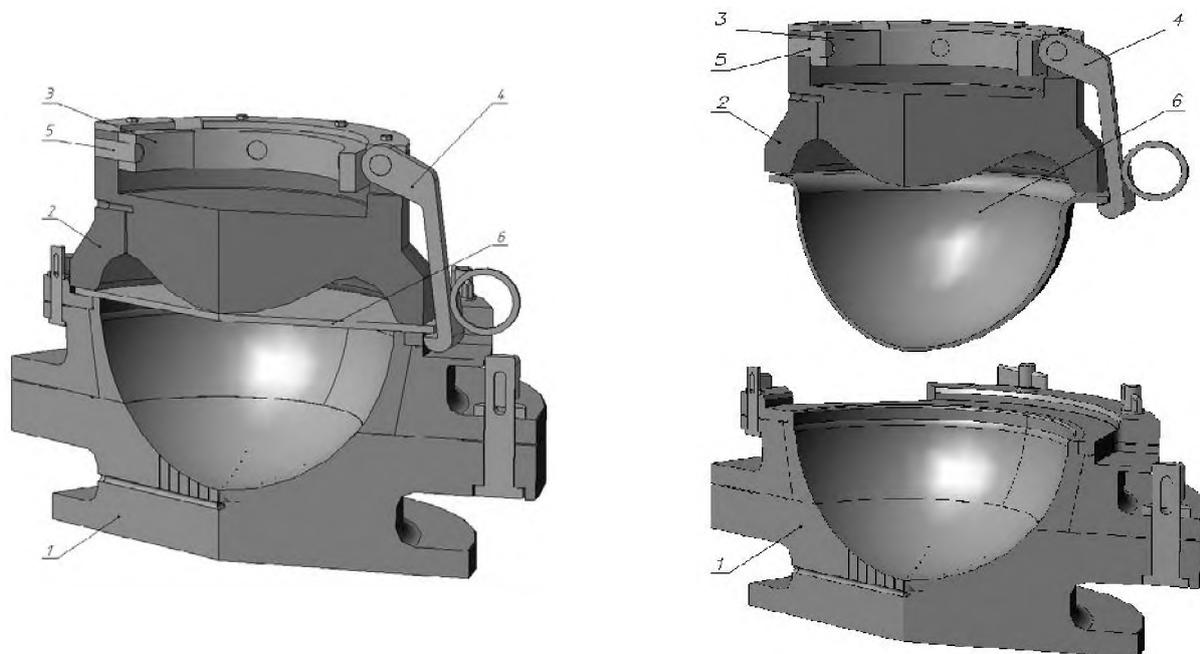
Высокие тактико-технические характеристики изделий обеспечиваются, помимо выбора материала, также и степенью совершенства технологии изготовления. Сегодня применяются три основные технологии формообразования полусфер погружных шаробаллонов (ПТШБ): объёмная изотермическая штамповка, горячая объёмная штамповка и полугорячая листовая штамповка, в т.ч. реверсивная пневмотермическая формовка в вакууме с использованием эффекта сверхпластичности [1].

Существенными недостатками данных технологических процессов являются значительные технологические напуски и возникающий в процессе обработки газонасыщенный поверхностный слой с изменёнными физи-

ко-механическими и пониженными технологическими свойствами, склонный к образованию трещин, которые являются концентраторами напряжений, приводящими к преждевременному разрушению изделий.

Анализ отечественного и зарубежного опыта изготовления полусфер методами пластического формообразования позволил специалистам ФГУП «НПО «Техномаш» разработать альтернативный метод сферодвижного формообразования полусфер шаробаллонов.

Метод сферодвижного формообразования [2], знаковым признаком которого является сложное перемещение деформирующего инструмента (пуансона) по обрабатываемой заготовке: обкатывание и качания создают в очаге деформации заготовки знакопеременную схему деформирования, которая, в свою очередь, формирует энергетику реализации эффекта Баушингера [3].



Исходное положение

Извлечение отформованной полусферы

Рис. 1 – Устройство для реверсивной формовки полусфер шаробаллонов:  
1 – нижняя часть макета штампа; 2 – верхняя часть макета штампа; 3 – опорное кольцо;  
4 – стёмник детали; 5 – предохранитель, 6 – полусфера шаробаллона

Разработанная установка для сферодвижного формообразования полусфер шаробаллонов (рис. 2) состоит из основания 1 с горизонтальным поворотным столом 2, на котором размещены матрицы 3, полый колонны 4 с вертикальным суппортом 5, на котором установлен пуансон 6 с приводным механизмом вертикальных возвратно-поступательных перемещений 7 и механизмом качания и обкатывания пуансона 8, который кинематически соединён с приводом механизма вертикальных возвратно-поступательных перемещений пуансона 7.

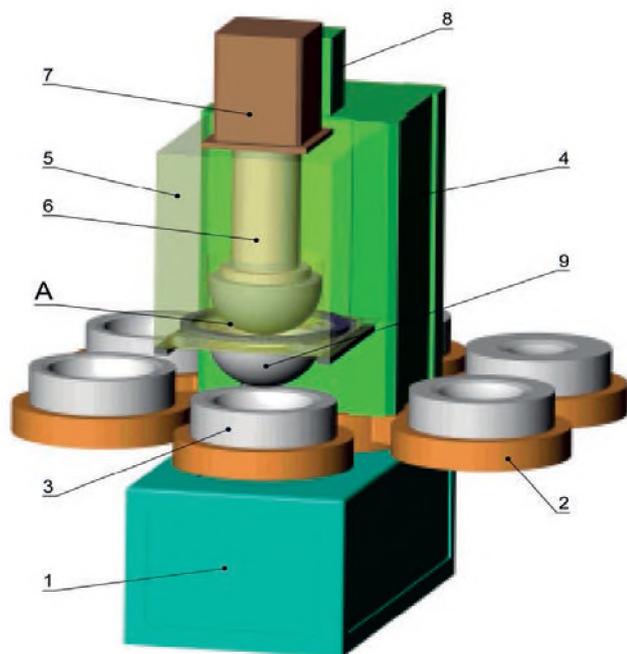


Рис. 2. Установка для сферодвижного формообразования полусфер шаробаллонов

Устройство работает следующим образом: листовую заготовку (на чертеже не показана) размещают на вертикальном суппорте 5 в верхнем его положении. Поворотный стол 2 с матрицами 3 поворачивают таким образом, чтобы матрица первоначального формоизменения исходной заготовки разместилась под пуансоном 6, обеспечивая их соосность. Затем вертикальный суппорт 5 с заготовкой перемещают вниз и прижимают заготовку к матрице 3. После этого включают привод механизма 7 вертикального возвратно-поступательного перемещения пуансона 6 и подводят его к поверхности заготовки до контакта с ней. Затем производят подключение механизма 8 качания и обкатывания пуансона 6 и осуществляют частичное формообразование полусферы матрицы 3 первоначального

формообразования заготовки. Завершив первоначальное формообразование, пуансон 6 поднимают, стол 2 поворачивают, подводя под пуансон 6 матрицу следующей стадии обработки, и процесс формообразования повторяют до получения готовой детали.

Выполнение рабочей поверхности А пуансона 6 в форме поверхности эволюты обеспечивает при качании и обкатывании пуансона 6 в полости полуфабриката полусферы 9 реализацию знакопеременного механизма деформации, который, в свою очередь, формирует в очаге деформации энергетические условия проявления эффекта Баушингера («запоминание» материалом истории его деформирования).

Деформирование полуфабриката в условиях проявления эффекта Баушингера создаёт энергетику прохождения механизмов волновой пластической деформации [3], которая обеспечивает обогащение деформируемого материала дислокациями, что резко повышает технологическую пластичность материала, исключая неоднородность распределения напряжений в нём и последующее нарушение сплошности материала готовой детали.

Этот эффект реализован автором [5] при изготовлении мембран датчиков абсолютного, относительного и дифференциального заявления. Результат позволил разработать методологию повышения технологической пластичности обрабатываемого материала в энергетических условиях проявления эффекта сферодинамики [6].

В процессе обработки металлов давлением длительное сохранение технологической пластичности обеспечивает высокое качество получаемых деталей.

#### Список литературы

1. Создание типового технологического процесса и оборудования для газовой формовки полусфер титановых шаробаллонов в защитной среде с использованием эффекта сферпластичности / Г.Г. Кривенко, С.М. Вайцехович, В.Е. Харсеев, А.А. Шитиков // Сб. отраслевой НПК Унификация конструкций и специализация производства – главнейшая задача оптимизации ракетно-космической отрасли. г. Королёв, 18–19 апреля 2013 г. С. 23–27.
2. А.с. 310718 СССР, МКИ В21J5/06. Способ деформирования заготовки / А.Н. Силичев (СССР), заявл. 20.06.62, опубл. 09.08.71. Бюл. № 24.
3. Хоникомб Р. Пластическое деформирование металлов. М.: Наука, 1972. 217 с.
4. Панин В.Е. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. М.: Наука, 1990, С. 9–14.
5. А.с. 300458 СССР, МКИ В21J5/06. Способ изготовления мембран датчиков давления. В.Г. Бещев (СССР), заявл. 30.09.86, опубл. 27.10.88. Бюл. № 37.

## ◆ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

УДК 629.76.018

Кологов А.В., Усов Г.Л.

### Моделирование технологии испытаний изделий на герметичность

В работе приведена разработанная математическая модель расчёта параметров физических процессов в полостях агрегатов при их заполнении смесью газов из баллонов ограниченного объёма с учётом сопротивления подводящих трубопроводов. Модель позволяет рассчитывать изменение по времени давления, температуры и состава смеси газов в заполняемых полостях агрегатов.

**Ключевые слова:** баллон, полости агрегатов, трубопровод, газ, гелий, воздух, давление, температура, концентрация, расход.

В процессе подготовки систем ракетной и авиационной техники к проведению стендовых и лётных испытаний возникает необходимость проверки свободных полостей агрегатов и систем на герметичность. Операции такой проверки хорошо известны, отработаны и как правило, их проведению предшествуют работы по подготовке контрольной газовой среды для заполнения полостей до заданного избыточного давления. Такой газовой средой может быть гелиево-воздушная или гелиево-азотная смесь, или другая, аналогичная. При подготовке таких смесей возникают вопросы достоверного выбора временного диапазона подготовки до заданной концентрации, объёма материальных затрат, связанных с располагаемыми объёмами и количеством газов, находящихся в наличии. Разработанная методика моделирования, по мнению авторов, может оказать помощь специалистам, проводящим испытания на герметичность, при решении затронутых вопросов.

За основу принята схема создания гелиево-воздушной смеси в объекте испытаний, приведённая на рис. 1.

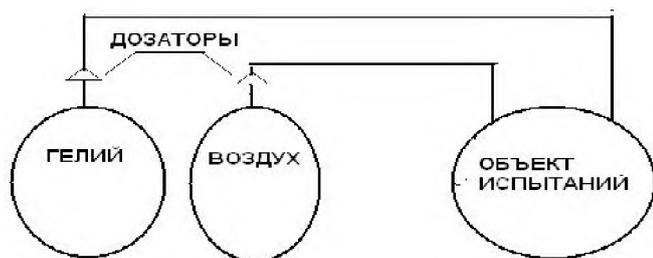


Рис. 1. Схема создания гелиево-воздушной смеси

Воздух и гелий из источников (баллонов) через дозаторы (жиклеры с определённым диаметром проходного сечения) подаются в полость объекта испытания. Время подвода газа определяется давлением и концентрацией смеси, которые диктуются условиями испытаний.

Для определения изменения по времени работы температуры  $T_6$  и давления  $P_6$  газа в баллоне, имеющем объём  $V_6$ , при истечении из него газовой среды расходом  $G$  могут быть использованы следующие зависимости, преобразованные из уравнений первого закона термодинамики и передачи тепла:

$$\frac{dP_6}{d\tau} = [q_{cm} \cdot (k-1) - kRT_6] \cdot \frac{1}{V_6},$$

$$\frac{dT_6}{d\tau} = [q_{cm} - RGT_6] \cdot \frac{T_6 \cdot (k-1)}{P_6 \cdot V_6},$$

$$\frac{dT_{cm}}{d\tau} = [q_{cp} - q_{cm}] \cdot \frac{1}{c \cdot M_6},$$

где  $c$  – теплоёмкость материала стенки баллона;  $M_6$  – масса баллона;

$q_{cm}$ ,  $q_{cp}$  – количество тепла, передаваемое от стенки баллона к газу и от окружающей среды к стенке;  $q_{cm} = \alpha_{cm} \cdot F \cdot (T_{cm} - T_6)$ ,  $q_{cp} = \alpha_{cp} \cdot F \cdot (T_{cp} - T_{cm})$ .

Индексы:  $cm$  – относится к стенке,  $cp$  – к окружающей среде.

При установке на выходе из баллона дозирующего устройства с проходной площадью отверстия  $f_{жс}$  расход газа наддува  $G$  может зависеть от величины давления  $P_1$  за дозирующим устройством и для его определения вводятся следующие зависимости:

если  $\frac{P_1}{P_b} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  – критический режим течения газовой среды,

$$G = f_{жс} P_b \sqrt{\frac{kg}{RT_b} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad (1)$$

если  $\frac{P_1}{P_b} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  – докритический режим течения

$$G = f_{жс} P_b \sqrt{\frac{2kg}{(k-1)RT_b} \left[ \left(\frac{P_1}{P_b}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_b}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (2)$$

Формула (1) используется в случае установления в узком сечении дозирующего устройства (жиклера) скорости равной скорости звука – критический режим течения. При докритических режимах применяется формула (2). Проверяется возможность применения этих формул и соответствие рассчитанного значения расхода, тому, которое обеспечивается пропускной способностью системы. Для этого используются следующие зависимости от коэффициента скорости  $\lambda_2$  для расхода  $G$ , приведённой плотности

тока  $q(\lambda_2)$ , полного давления  $P_{em}^*$  в трубопроводе, имеющему площадь проходного сечения  $f_m$ , на входе в полости агрегатов объекта испытания:

$$\left. \begin{aligned} G &= P_{em}^* f_m q(\lambda_2) \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{kg}{RT_0}}, \\ q(\lambda_2) &= \lambda_2 \left[ \frac{k+1}{2} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2\right) \right]^{\frac{1}{k-1}}, \\ \frac{P_{em}}{P_{em}^*} &= \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{aligned} \right\} (3)$$

Система уравнений (3) даёт возможность вычислить коэффициент скорости  $\lambda_2$ .

Далее в трубопроводе постоянного сечения длиной  $l$  и диаметром  $d$  для выбранного значения суммарного эквивалентного коэффициента трения  $\xi$  определяется коэффициент скорости  $\lambda_1$  за дозирующим жиклером

$$\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{1}{\lambda_2^2} - \ln \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} = \frac{2k}{k+1} \xi \frac{l}{d} \quad (4)$$

и находится приведённая плотность тока  $q(\lambda_1)$  по формуле из системы (3). Затем вычисляется значение нового расхода газа  $G_1$  в трубопроводе за жиклером:

$$G_1 = P_0^* f_m q(\lambda_1) \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{kg}{RT_0}} \quad (5)$$

Если значение  $G_1$  отличается от вычисленного ранее расхода  $G$ , вновь проводятся расчёты, начиная с системы (3), используя полученное значение расхода  $G_1$ , до совпадения расходов.

При описании термодинамических процессов в полости объекта испытания при подводе смеси газов из источников использованы уравнения изменения энергии и массы среды, аналогичные тем, что применялись для расчёта параметров в газовых баллонах. Однако здесь следует остановиться на том факте, что в объекте испытания происходит изменение массы нескольких газов одновременно, в результате чего теплофизические характеристики смеси (теплоёмкость, показатель изэнтропы и т.д.) не остаются постоянными с течением времени проведения процесса. Эти особенности учтены при моделировании поведения среды в системе, а уравнения консервации энергии и массы в полостях агрегатов для давления  $P_{em}$ , температуры  $T_{em}$  и показателя адиабаты  $k_{em}$  в ней использованы в следующем виде:

$$\frac{dP_{em}}{d\tau} = \frac{(k_1-1)}{V} \left( \frac{k_1}{k_1-1} \dot{G}_1 \cdot R_1 \cdot T_1 + \frac{k_2}{k_2-1} \dot{G}_2 \cdot R_2 \cdot T_2 - q \right) + \frac{P_{em}}{k_{em}-1} \frac{dk_{em}}{d\tau},$$

$$\frac{dT_{em}}{d\tau} = T_{em} \left( \frac{1}{P} \frac{dP_{em}}{d\tau} - \frac{\dot{G}_1 + \dot{G}_2}{G} - \frac{1}{R} \frac{dR_{em}}{d\tau} \right).$$

Индексы при параметрах:  $em$  – для полостей агрегатов объекта испытаний,  $1$  и  $2$  – для подаваемых в полости агрегатов различных газов.

Эта система уравнений дополняется зависимостями для расчёта массового содержания  $g_i$  каждого газа, его парциального давления  $P_i$ , объёмной доли  $r_i$ , газовой постоянной смеси  $R_{em}$ , показателя адиабаты  $k_{em}$ :

$$g_i = G_i/G, \quad R_{em} = \sum g_i \cdot R_i, \quad P_i = P_{em} \cdot g_i \cdot R_i / R_{em},$$

$$r_i = g_i \cdot R_i / R_{em}, \quad k_{em} = \sum g_i \cdot k_i.$$

Для решения обыкновенных дифференциальных уравнений использован хорошо зарекомендовавший себя на практике численный метод Рунге-Кутты, алгоритм решения, по которому состоит в следующем.

Пусть для функции  $y$  есть система дифференциальных уравнений  $\frac{dy}{d\tau} = F(\tau, y)$ , например, рассматриваемая система для переменных  $P_{em}, T_{em}$  с начальными условиями  $y(\tau_0) = y_0$ .

Задав шаг  $\Delta\tau$ , и введя обозначения  $\tau_i = \tau_0 + i \cdot \Delta\tau$  и  $y_i = y(\tau_i)$  для  $i = 0, 1, 2, \dots$ , положим

$$K_1 = \Delta\tau \cdot F(\tau_i, y_i),$$

$$K_2 = \Delta\tau \cdot F(\tau_i + 0,5 \cdot \Delta\tau, y_i + 0,5 \cdot K_1),$$

$$K_3 = \Delta\tau \cdot F(\tau_i + 0,5 \cdot \Delta\tau, y_i + 0,5 \cdot K_2),$$

$$K_4 = \Delta\tau \cdot F(\tau_i + \Delta\tau, y_i + K_3)$$

В этом случае, согласно обычному методу Рунге-Кутты, последовательные значения  $y_i$  искомой функции определяются по формуле

$$y_{i+1} = y_i + \frac{K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + K_4}{6}.$$

В качестве примеров на рис. 1, 2 и 3 приведены результаты расчёта изменения по времени давления в ёмкости объекта испытания, концентрации газов в ней и показателя адиабаты в зависимости от диаметра жиклера, установленного в системе подачи гелия. Расчёты проведены для двух значений диаметра жиклера:  $d = 2$  мм и  $d = 6$  мм при следующих исходных данных:

- начальное давление в баллоне с гелием  $P = 220$  атм, объём  $V = 0,8$  м<sup>3</sup>;
- начальное давление в полости объекта испытаний  $P_0 = 1$  атм;
- расход воздуха  $G_0 = 0,1$  кг/с;
- длина трубопровода подвода гелия  $l = 8$  м.

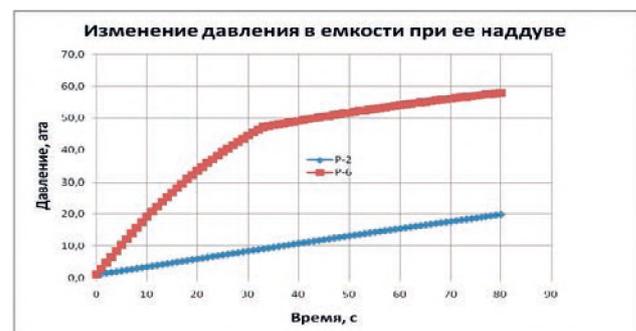


Рис. 2. Давление в полостях агрегатов объекта испытаний

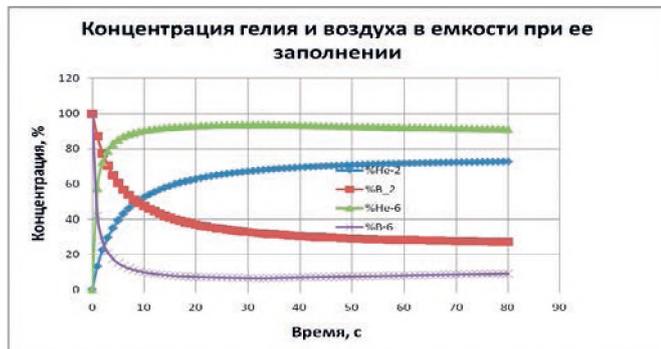


Рис. 3. Изменение концентрации газов в полостях агрегатов объекта испытаний

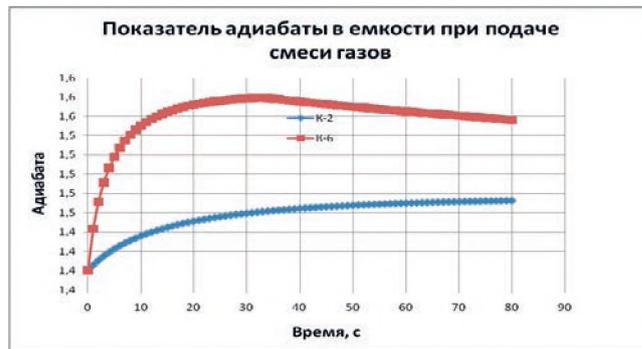


Рис. 4. Изменение показателя адиабаты в полостях агрегатов объекта испытаний

УДК 629.7.036.5

Усов Г.Л., Кологов А.В., Венгерский Э.В.

### Математическая модель движения жидкой среды по трубопроводу с проточным демпфером

Приведена физико-математическая модель расчетного исследования нестационарного течения жидкости, содержащей растворенный газ, от бака к ракетному двигателю по круглому трубопроводу с демпфером. Рассмотрено решение одномерной задачи как в сосредоточенных, так и в распределенных по длине трубопровода параметрах. Учтено влияние термодинамических процессов в демпфере на параметры движения среды по трубопроводу.

**Ключевые слова:** математическая модель, система подачи топлива, жидкость, газ, бак, демпфер, скорость, давление, неустановившееся движение, уравнение.

Практика проектирования, конструирования и исследования процессов в системах подачи топлива летательных аппаратов к жидкостным ракетным двигателям (ЖРД) показывает, что к настоящему времени процессы, происходящие в магистралях систем питания двигателей, изучены довольно подробно, описывающие их закономерности отражают, как правило, реальные соотношения между параметрами движущейся жидкости, если рассматривается однофазное топливо. Однако получение достоверных количественных характеристик и проведение математического моделирования процессов течения жидких компонентов топлива существенно осложняется, если условия движения жидкости по магистралям с подключенным газожидкостным демпфером способствуют образованию двухфазного потока, сопровождающегося механическим и тепловым взаимодействием фаз.

В данной работе приведены физико-математическая модель и алгоритм программы для анализа и расчёта параметров гидродинамических процессов в системах питания ЖРД с проточным демпфером при работе как на установившихся, так и на переходных нестационарных режимах двигателя. По мнению авторов, предлагаемые методические материалы и программное обеспечение дадут возможность определять зависимости параметров среды в сложных системах питания ЖРД от конструктивных и эксплуатационных факторов, что, в свою очередь, может снизить затраты на стендовую отработку и обеспе-

чит прогноз поведения параметров для любых возможных режимов работы ракетной установки.

При разработке математической модели принята схема системы подачи компонента топлива из бака к двигателю, приведённая на рис. 1, содержащая проточный демпфер с баллоном наддува.

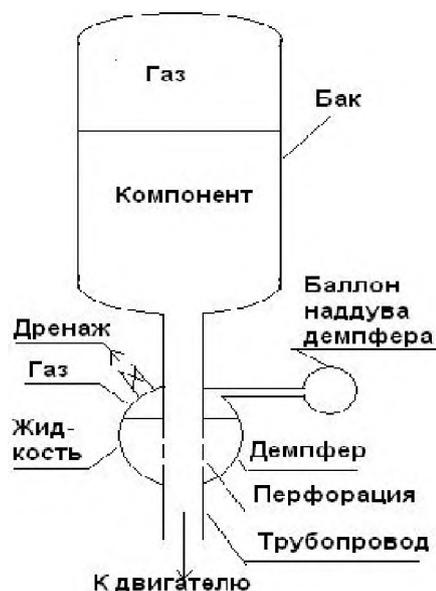


Рис. 1. Система подачи компонента топлива

Особенностью гидродинамических процессов в такой системе подачи компонента топлива является взаимовлияние параметров в жидкостной и газовой полостях демпфера и в жидкостной полости магистрали питания. При этом следует отметить следующие особенности прохождения гидродинамических процессов. Из-за изменения режима работы двигателя давление и скорость жидкости в расходном трубопроводе претерпевают изменения, что оказывает влияние на режим поступления компонента топлива в расходный трубопровод как из бака, так и из демпфера через перфорацию. При опорожнении газового баллона наддува демпфера и снижения в нём давления меняется количество газа, поступающего в демпфер, что также оказывает влияние на режим течения жидкости из демпфера (или наоборот) в расходный трубопровод. Это, в свою очередь, при соответствующих условиях может воздействовать на величину давления жидкости на входе в двигатель.

Наличие системы дренажа компонента топлива из демпфера обеспечивает выброс жидкости или газа и воздействует на перетечки через перфорацию в расходном трубопроводе.

В процессе движения жидкости по магистрали питания возможно изменение скорости течения и давления по тракту питания двигателя, что воздействует на выделение растворенного в компоненте топлива газа. Возникновение в магистралях системы питания двухфазного газожидкостного потока может привести к видоизменению динамических характеристик ракеты, снижению кавитационных запасов насосов, увеличению гидравлических потерь давления. Степень влияния двухфазности потока на параметры течения и характеристики ракетной установки, в целом, определяются, прежде всего, относительной объёмной концентрацией газопаровой фазы. В общем случае такой процесс зависит от времени, является неравновесным и носит релаксационный характер, что требует учёта кинетики процессов выделения и растворения газовой фазы [1].

При разработке технологии расчёта и создании математических моделей в качестве направлений исследований решались следующие основные вопросы:

- выбор, анализ и разработка математических зависимостей, реально отражающих поведение процессов в системе питания, приведённой на рис. 1, при различных режимах работы двигателя;
- разработка методов нахождения решений уравнений гидродинамических процессов.

При решении вопросов первого направления и для исследования неустановившегося движения жидкого компонента топлива, насыщенного газом, по расходной магистрали с диаметром  $d$  и площадью проходного сечения  $s$  от бака до демпфера (до перфорации) и от демпфера до входа в двигатель и определения изменения давления  $P$  и расхода среды  $G$  по длине  $x$  и времени течения  $\tau$  использовались уравнения сохранения количества движения, массы и изменения концентрации газовой фазы в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{a^2}{s} \cdot \frac{\partial G}{\partial x} &= 0, \\ \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial G}{\partial \tau} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda}{2d\rho} \cdot \left(\frac{G}{s}\right)^2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \frac{1}{s \cdot \rho_g} \cdot \frac{\partial (G\varphi)}{\partial x} = J. \quad (2)$$

Здесь  $a$  – скорость распространения малых возмущений в движущейся среде,  $\lambda$  – коэффициент сопротивления,  $\rho$  – плотность среды,  $\rho_g$  – плотность газа,  $\varphi$  – относительное содержание газовой фазы,  $J$  – интенсивность выделения газа из жидкой фазы.

При определении скорости распространения малых возмущений  $a$  использовалась зависимость, связывающая изменение плотности среды с изменением давления и степенью насыщения жидкой фазы газом  $\psi(\varphi)$  [1]:

$$a = \frac{a_{ж}}{\sqrt{\left(1 + \frac{d \cdot A_a}{A_s \cdot \delta}\right)} \cdot \psi(\varphi)}$$

Здесь  $a_{ж}$ ,  $E_{ж}$ ,  $E_m$ ,  $\delta$  – соответственно, скорость распространения малых возмущений в жидкости, модуль упругости жидкости и материала трубопровода, толщина стенки трубопровода.

Для определения интенсивности выделения газа  $J$  и коэффициента  $\psi(\varphi)$  используются зависимости, приведённые соответственно на с. 76 и с. 65 [1].

Движение жидкого компонента топлива не является стационарным как из-за изменяющегося по времени расхода через двигатель, так и из-за силового воздействия на жидкость газовой фазы переменной массы, находящейся внутри демпфера. Для определения степени влияния этих процессов на характер движения компонента топлива и его параметры дополнительно привлекаются уравнения изменения количества движения и баланса массы газа и жидкости в демпфере:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dG_{dem}}{d\tau} &= \frac{s_d^2 (P_{dem} - P_{жс})}{V} - \frac{G_{dem}^2}{\rho \cdot V}, \\ \frac{dP_{dem}}{d\tau} &= \frac{1}{V_{dem}} \cdot \left[ \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g (\kappa_{gm} - 1) (g_{ex} T_{ex} - g_{вх} T_{вх}) - \frac{\kappa_{gm} \cdot P_{dem} \cdot G_{dem}}{\rho} \right], \\ \frac{dG_g}{d\tau} &= g_{ex} - g_{вх}, \\ \frac{dV_{dem}}{d\tau} &= \frac{G_{dem}}{\rho} + q_{ym}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $G_{dem}$  – расход жидкости из демпфера;  $G_g$  – масса газа в демпфере;  $P_{dem}$  и  $P_{жс}$  – давление в газовой полости демпфера и в переливных отверстиях расходной магистрали;  $V_{dem}$  и  $V_{gdem}$  – объёмы газовой и жидкостной полостей демпфера;  $g_{ex}$ ,  $g_{вх}$  и  $q_{ym}$  – соответственно, расход газа в демпфер из источника (баллона), расход газа через трубку дренажа (при освождении её выходного сечения из жидкости), расход



жидкой фазы через трубку дренажа;  $T_{ex}$  и  $T_{dem}$  – температура газа наддува демпфера и в его газовой полости;  $R_g$  и  $s_d$  – газовая постоянная среды наддува и площадь сечения трубки дренажа;  $\kappa$  и  $\kappa_{cm}$  – показатель адиабаты газа наддува и в газовой полости демпфера.

Второе направление исследования относится к непосредственному использованию вышеприведённых математических зависимостей. Для этого в качестве основного для уравнений (1) рекомендовано использовать метод характеристик, идея которого заключается в следующем [2].

Когда фронт волны или фронт возмущения приходит в какую-либо точку среды, он воздействует на движущиеся частицы, и в течение бесконечно малого промежутка времени значения производных изменяются на конечную величину. Следовательно, эти производные в момент прихода фронта волны в данную точку среды однозначно найти нельзя. Это положение и является основой при выводе метода характеристик. Не вдаваясь в подробности (они достаточно полно изложены в специальной литературе), из уравнений (1) можно получить два дифференциальных соотношения:

$$\left. \begin{aligned} dP + \frac{a}{s} dG + dx \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \rho \cdot s^2 \cdot d} G^2 \right) &= 0, \\ dP - \frac{a}{s} dG - dx \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \rho \cdot s^2 \cdot d} G^2 \right) &= 0, \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

которые справедливы на двух направлениях

$$\left. \begin{aligned} ad\tau - dx &= 0, \\ ad\tau + dx &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Для решения используется метод Массо, в основе которого лежит замена дифференциальных уравнений характеристик (4) – (5) соответствующими разностными уравнениями. Эти модифицированные уравнения рассматриваются совместно с уравнением (2), для приведения которого к виду, удобному для решения, может быть использован метод конечных разностей [3].

Суть метода конечных разностей состоит в том, что в рассматриваемой области плоскости  $x, \tau$  вместо непрерывной среды, состояние которой описывается функциями непрерывного аргумента, вводится ее разностный аналог. При применении метода конечных разностей дифференциальные уравнения заменяются соответствующими алгебраическими конечно-разностными соотношениями, а область непрерывного изменения аргументов  $x$  и  $\tau$  заменяется дискретным множеством точек, являющимся областью определения функции дискретного аргумента. Такое множество является разностной сеткой с координатами  $x=i\Delta x, \tau=j\Delta\tau$ , где шаги сетки  $\Delta x$  и  $\Delta\tau$  являются малыми положительными приращениями переменных  $x$  и  $\tau$ .

Соответственно, вместо функций непрерывных аргументов  $f(x, \tau)$  рассматриваются функции дискретных аргументов  $f_i^j$ , определённые в узлах сетки ( $i\Delta x, j\Delta\tau$ ) и называемые сеточными функциями. Под  $f$  подразумеваются параметры газа  $\rho, \varphi$  (см. уравнения 1, 2).

Аппроксимированная конечно-разностная система уравнений (1) – (2) рассматривается в каждый момент времени совместно с уравнениями процесса в демпфере (3), к которым применён метод Рунге-Кутты [2].

Иногда, если условия исследования неустановившихся процессов позволяют рассматривать упрощённый подход без существенной потери точности, уравнение движения (1) может быть принято в сосредоточенных параметрах без распределения по длине расходного трубопровода. В этом случае для расходного трубопровода длиной  $l$  с учётом положений принципа Д'Аламбера допускается использование следующей зависимости:

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{s}{l} \left[ P_1 - P_2 + \frac{\lambda l}{2 \cdot \rho \cdot s^2} G^2 \right]. \quad (6)$$

В данном случае также может быть использован метод Рунге-Кутты.

При разработке программы расчётных исследований выбран объектно-ориентированный язык программирования Visual Basic for Application и использовались отдельные самостоятельные подпрограммы, объединённые управляющей программой, применительно к ЭВМ IBM PC. Разработанный файл имеет название «Демпфер.xls» и позволяет проводить расчётное исследование для трёх моделей:

- а) полная модель с учётом кинетики газовой выделенной, разработанная на базе системы уравнений (1), (2) и (3);
- б) без учёта кинетики (использованы зависимости (1), (3));
- в) в сосредоточенных параметрах (использованы уравнения (6) и (3)).

Практика расчётных исследований показала вполне ожидаемый результат, что наибольшую нагрузку по времени счёта следует ожидать от использования варианта «а». Кроме того, подмечено, что для невысоких степеней газонасыщения и относительно высоких давлений в магистралях питания все три модели дают практически одни и те же результаты. Поэтому на квазистационарных режимах работы после запуска в случае невысоких концентраций газа в жидком окислителе и при дефиците времени счёта более целесообразно использовать модель «в». Для исследования процессов при запуске двигателя следует применять ту модель, которая даёт более точные значения по значимому в данный момент параметру.

В качестве примера на рис. 2 и 3 для трёх вышеприведённых математических моделей даны результаты расчёта изменения давления в конце расходного трубопровода на входе в двигатель и в газовой полости демпфера в пятисекундном промежутке после команды на запуск двигателя при использовании в качестве компонента топлива жидкого кислорода, насыщенного гелием. Принятое при расчётах изменение массового расхода жидкого окислителя приведено на рис. 4.

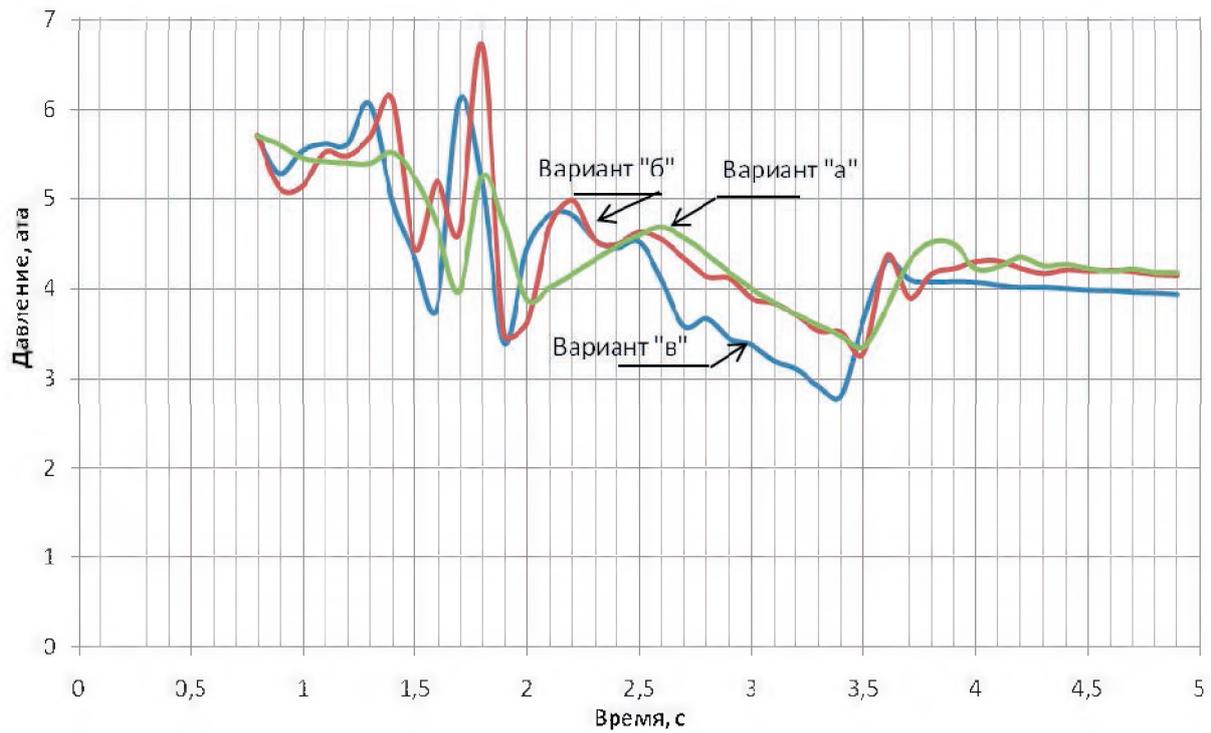


Рис. 2. Давление на входе в двигатель

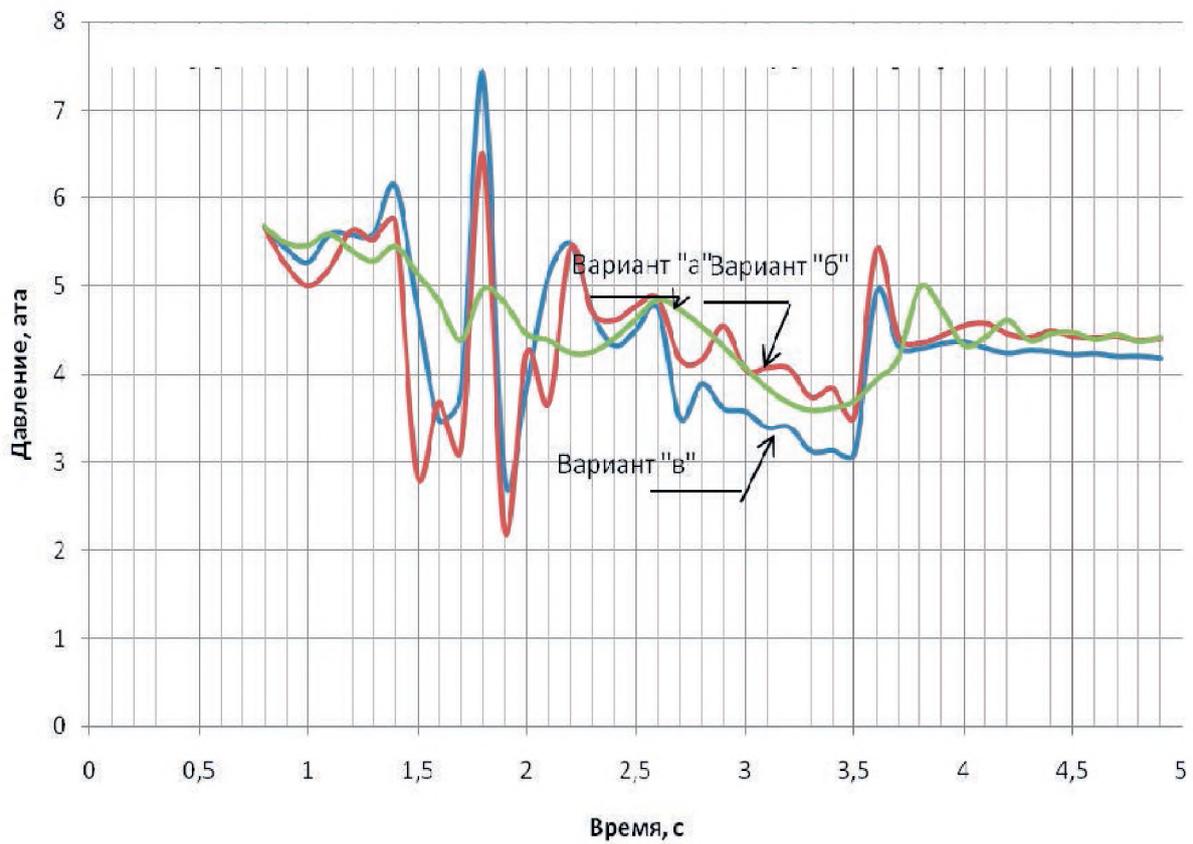


Рис. 3. Давление в газовой полости демфера



Рис. 4. Расход компонента топлива на входе в двигатель

В подтверждение достоверности разработанных моделей на рис. 5 приведены результаты расчёта и данные измерений давления в расходной магистрали (на стыке с двигателем), зафиксированные при проведении стендовых испытаний.



Рис. 5. Сравнительные данные по давлению перед двигателем

### Список литературы

1. Венгерский Э.В., Морозов В.А., Усов Г.Л. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок. М.: Машиностроение. 1982. 128 с.
2. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. т. II. М.: Физматгиз. 1962. 639 с.
3. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир. 1972. 418 с.



УДК620.163.29(063.74)

*Кологов А.В., Соловьев В.Н., Тихомиров К.А., Барышников В.И.*

## Гелиевые контрольные течи для ракетно-космической промышленности

В статье обозначена необходимость расширения выпуска гелиевых контрольных течей для ракетно-космической промышленности. Обозначены недостатки поверяемых контрольных течей Гелит-1 и Гелит-2.

Проведён анализ наиболее зарекомендовавших себя конструкций. Охарактеризованы недостатки сложившегося метрологического обеспечения суммарных и локальных методов контроля герметичности. Намечены пути расширения диапазона нормируемых утечек, качества контрольных течей и точности их калибровки. Определены задачи для организаций к проверке течей более широкого диапазона меньших погрешностей.

**Ключевые слова:** контрольная течь, суммарная погрешность оценки потока гелия, стеклянные капиллярные контрольные течи, диапазон потоков, госповерка контрольных течей, ведомственная аттестация течей, точностные характеристики способов течеискания.

Масс-спектрометрический метод с применением гелиевых течеискателей, несомненно, занимает ведущее место при контроле степени герметичности сложных изделий ракетно-космической техники (РКТ). Со времени начала широкого применения течеискателей типа ПТИ в масс-спектрометрическом методе контроля, вопрос о градуировке шкалы течеискателя в реальной схеме испытаний всегда оставался актуальным. В течеискателях ПТИ-4, ПТИ-6 не применялись комплектные контрольные течи, но в 1965 году НИИВТ разработало поверяемые диффузионные гелиевые течи типа Гелит, и вопрос о калибровке шкалы и определении приборной чувствительности самого течеискателя стал решаемым. Применение именно диффузионных гелиевых течей позволило перейти к их массовому выпуску и получить приемлемые характеристики по надёжности и точности.

В авиакосмической и радиоэлектронной отраслях промышленности, начиная с 1962 года, применяются отраслевые контрольные течи для калибровки технологических схем течеискания, которые используются и поныне. За калибровку технологических контрольных течей несут ответственность службы Главных метрологов предприятий.

Поверяемые диффузионные контрольные течи Гелит-1 и Гелит-2 перекрывают лишь небольшой диапазон контролируемых потоков гелия в вакуум  $10^{-9} \div 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-5} \div 10^{-4}$  л мкм рт. ст/с). Эти контрольные течи характеризуются достаточно большой погрешностью по потоку гелия ( $\pm 15 \div 20\%$ ) и имеют существенную зависимость потока от температуры. Для эталонирования атмосферных способов течеискания такие контрольные течи вообще не пригодны. Постоянное истечение гелия, вне зависимости от откачки, накапливает его в закрытом выходном патрубке течи и приводит к большому забросу показаний в начале калибровки. В процессе калибровки схемы течеискания на любых вакуумных системах, включение контрольной течи без предварительной откачки существенно искажает временные характеристики схемы течеискания и снижает достоверность контроля герметичности изделий. В вакуумных системах течеискателей, как и в любых других точках калибровки схемы течеискания, необходимо вводить предварительную

откачку гелия из патрубка контрольной течи, а хранение диффузионной контрольной течи производить, соединив патрубок течи с атмосферой. На большинстве предприятий аэрокосмической промышленности такой подход соблюдался изначально.

Для корректного определения чувствительности способа вакуумирования в смежных отраслях разработан ГОСТ Р 53177-2008 «Определение характеристик масс-спектрометрического метода контроля герметичности», предусматривающий предварительную откачку полости течи до давления не более 5 Па, непосредственно перед подключением в калибруемую схему. Однако в самих течеискателях стандарт, к сожалению, пока применения не нашёл.

В ракетно-космической промышленности (РКП) есть потребность в обеспечении вакуумными и атмосферными гелиевыми контрольными течами в диапазоне потоков  $10^{-11} \div 10^{-3}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-7} \div 10^{-1}$  л мкм рт. ст/с). Таким образом, обойтись поверяемыми контрольными течами типа Гелит-1 и Гелит-2 во всём многообразии применяемых технологий и диапазонах контролируемых потоков гелия, практически невозможно. Поэтому отраслевые контрольные течи, изготавливаемые отраслевыми предприятиями, сегодня всё ещё востребованы. Вопрос заключается в создании Госкорпорацией «Роскосмос» условий для централизованного изготовления и проверки таких течей, а также в соответствии методик их калибровки и проверки современным требованиям менеджмента качества.

На сегодняшний день службы Главных метрологов предприятий, ослабленные постперестроечным упадком, не проявляют заинтересованности в калибровке отраслевых контрольных течей своими силами, тем более, что изменились требования к метрологии и менеджменту качества. Взамен производству предлагается закупать готовые метрологически поверенные изделия, которые централизованно, пока никто не выпускает.

Применение отраслевых контрольных течей в технологиях РКП регулируется стандартом ОСТ 92-2125-87 «Течи контрольные. Технические условия». Стандарт распространяется на механические, капиллярные и диффузионные контрольные течи, применяемые в промышленности, и устанавливает типы отраслевых контрольных



течей, основные параметры, технические требования, комплектность, правила приёмки, методы испытаний, маркировку, упаковку, транспортирование и хранение, указания по эксплуатации и гарантию изготовителя. Однако централизованного производства и необходимой номенклатуры контрольных течей в масштабах отрасли пока не планируется.

Стандарт ОСТ 92-2125-87 устарел (1987 г.) и не отвечает сегодняшним запросам отрасли к номенклатуре и требованиям менеджмента качества (изготовление, аттестация, калибровка и т.п.). Тем не менее за последние 50 лет претензий к нему не было. Он удовлетворяет все базовые требования к основным типам контрольных течей, изготавливаемых в РКП. Вместе с тем, органы госповерки не готовы к аттестации всего многообразия выпускаемых промышленностью контрольных течей, а погрешности отраслевой калибровки, заложенные в стандарте, остаются весьма высокими. Централизованное изготовление, современные правила аттестации, методы калибровки и поверки течей могут обеспечить единство меры микропотока гелия на всех предприятиях отрасли с высокими метрологическими характеристиками.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), который занимается вопросами поверки контрольных течей и течеискателей, без серьёзного финансирования не готов охватить все метрологические аспекты современного течеискания. К наиболее острым вопросам относятся: аттестация вакуумных течей с потоками гелия ниже Гелит-2 и выше Гелит-1; поверка атмосферных контрольных течей всех диапазонов; эталонирование и измерения концентрации гелия в ppm; снижение погрешностей калибровки течей до  $\pm 10\%$ , при допустимой относительной погрешности течеискателей не более  $\pm 20\%$ .

В настоящее время основные запросы промышленности сводятся к выбору наиболее надёжных, хорошо зарекомендовавших себя, легко воспроизводимых конструкций отраслевых контрольных течей; к разработке методик аттестации и поверки на основе современных метрологических требований. Это относится к контрольным течам с любым допустимым пробным газом, включая гелий, по отраслевому стандарту ОСТ 92-1527-87 «Методы испытаний на герметичность с применением масс-спектрометрических течеискателей».

Отраслевому стандарту ОСТ 92-2125-87, регулиющему аттестацию и применение контрольных течей, соответствует следующая классификация их типов:

- течи механические регулируемые – ТМР;
- течи капиллярные – ТК;
- течи со стеклянным капилляром – ТК(с);
- течи с металлическим капилляром – ТК(м);
- течи капиллярные регулируемые (изменением давления контрольного газа на входе в капилляр) – ТКР;
- течи диффузионные – ТД;
- течи капиллярные с манометром – ТКМ.

Течи механические, широко распространённые в 70-х, теперь уже практически не применяются. Необходимость

точной регулировки потока для определения браковочного уровня, теперь компенсируется достаточной линейностью характеристик течеискателя в пределах  $\pm 1,5$  порядка. Диффузионные течи отраслевого исполнения имеют потоки гелия, соизмеримые с течами Гелит, и находят ограниченное применение при атмосферных испытаниях. Наиболее подходящими для комплексного применения в отрасли оказались контрольные течи со стеклянным капилляром ТК(с), хорошо зарекомендовавшие себя на предприятиях отрасли. Такие течи обладают высокой стабильностью, малыми температурными изменениями, локализацией истечения в одной точке, аналогично течам на изделии.

Все текущие нужды промышленности могут быть удовлетворены контрольными течами со стеклянным капилляром в следующих диапазонах нормированных утечек по пробному газу:

- для атмосферных испытаний с диапазоном  $10^{-11} \div 10^{-3} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-7} \div 10^{-1}$  л мкм рт. ст/с);
- для вакуумных течей в диапазонах  $10^{-11} \div 10^{-9}$  и  $10^{-8} \div 10^{-6} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-7} \div 10^{-5}$  и  $10^{-4} \div 10^{-2}$  л мкм рт. ст/с).

Учитывается, что диффузионные гелиевые контрольные течи типа Гелит закрывают потребность в вакуумных контрольных течах в диапазоне  $10^{-9} \div 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$ . Правда, погрешности калибровки течей Гелит не позволяют говорить о высоких метрологических стандартах. Технически, в современных условиях, снизить погрешности калибровки течей Гелит до уровня  $\pm 7 \div 9\%$  и ниже, вполне возможно.

Идентификация (измерения) реальных течей на испытуемой продукции в любых диапазонах без применения соответствующих контрольных течей не имеет правового статуса.

**Основными запросами отрасли следует считать централизованное изготовление необходимой номенклатуры контрольных течей, их аттестацию и поверку на предприятиях или в региональных центрах по современным метрологически обоснованным методикам с малыми погрешностями калибровки.**

Для решения стоящих задач во ФГУП «НПО «Техномаш» проведён подробный анализ состояния производства контрольных течей в отрасли, а также ряд метрологических исследований, направленных на обеспечение необходимого уровня качества. Внешние условия (давление, температура и др.) влияют на стабильность истечения газа через капилляр, а их изменения могут приводить к погрешностям в текущей оценке величины потока от течи на изделии. Рассмотрение вопросов, влияющих на поток газов, проходящих через канал стеклянного капилляра контрольной течи, предполагает необходимость учёта, в первую очередь, следующих физических факторов:

- изменение давления на входе в капилляр;
- изменение давления на выходе из капилляра;
- изменение температуры капилляра;
- изменение температуры газа в баллоне;
- наличие влажности в истекающем газе;



- изменение концентрации пробного газа во времени за счёт диффузионной утечки гелия из баллона;
- изменение концентрации гелия на откалиброванной течи в целях изменения потока пробного газа;
- изменения, связанные с засорением течи

### Выводы

- В формулах Пуазейля давление на входе в течь приведено во второй степени ( $P_1^2$ ), значит, следует ожидать значительного изменения потока через капилляр при изменении перепада давления на последнем.

Обычно снижение давления на входе в капилляр во времени связано с уносом части газа из питающей ёмкости через капилляр течи. Для вакуумных течей изменение давления в баллоне на 5% приводит, примерно, к 10% изменению потока. Для того, чтобы изменение потока через капилляр не превышало 5%, следует ограничиться потерей контрольного газа за время эксплуатации не более чем на 2,5%. Отсюда следует, что для контрольных течей с общим потоком газа свыше  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-3}$  л мкм рт. ст./с) – либо запасы газа в баллоне течи должны быть весьма велики, чтобы его потери за время эксплуатации не превышали 2,5%, либо на входе в капилляр необходимо устанавливать редуктор. Поток от контрольной течи можно корректировать по наработке или повторно калибровать при потере давления газа на 2% от первоначального. Капиллярные течи с манометром ТКМ обладают большими возможностями учёта давления, но манометры высокого гласа точности имеют большие габариты и существенно утяжеляют конструкцию, а малогабаритные манометры не дают необходимой точности. Применение датчиков давления требует наличия элементов питания и индикации, что существенно усложняет и увеличивает стоимость всей конструкции и создаёт неудобства при эксплуатации.

**Для контрольных течей, поток от которых определяется по давлению, функцию  $Q=f(P)$  следует рассчитывать с шагом порядка 1% от средней величины  $P$ . Тогда, погрешность определения потока будет не более 1,5÷2,0 %, что вполне приемлемо.**

- Изменение давления на выходе из капилляра может быть существенным только для контрольных течей с истечением в атмосферу. Анализ показывает, что при давлении газа на входе в капилляр порядка 2,5 атм, изменение потока, соответствующее максимальным отклонениям атмосферного давления от нормы, не превышает  $\pm 3,0\%$ , что вполне допустимо.

- Наиболее просто определить изменение потока газа через контрольную течь по изменению геометрии капилляра от температуры. При максимальной разнице между температурой в испытательном помещении от температуры калибровки течи  $\pm 10^\circ\text{C}$  изменение потока для капилляра из стекла С49-2 не превышает  $\pm 0,1\%$ . Таким изменением можно пренебречь.

- В замкнутой полости баллона увеличение температуры на  $5^\circ\text{C}$  приводит к увеличению давления в баллоне на 3,7%. Это будет соответствовать увеличению потока

через течь примерно на 7,5%, при неизменной вязкости и плотности газа. Примерно в той же мере изменится и вязкость газа, что приведёт к уменьшению потока через течь. Для замкнутой системы можно считать, что при небольшом изменении температуры расчётное изменение потока за счёт температурного изменения давления в значительной мере компенсируется противоположным изменением потока за счёт изменения вязкости газа, плотность газа в замкнутой системе остается практически неизменной.

- Заправка контрольных течей регламентируется ОСТ 92-0229-72 «Заполнение изделий контрольными газами при испытаниях на герметичность. Методика заполнения». Газы, используемые при испытаниях объектов РКТ, применяются с точкой росы не выше  $-55^\circ\text{C}$ . Однако на стенках любого стеклянного капилляра при любой влажности адсорбируются сотни мономолекулярных слоев воды. Истечение в вакуум может приводить к осушке части капилляра. Простейший анализ показывает, что кривая распределения давления по капилляру соответствует параболе, поэтому можно считать, что вакуум не может проникнуть на существенную часть капилляра и практически не влияет на его проводимость.

- Капиллярные контрольные течи с диапазоном потоков по воздуху  $10^{-11} \div 10^{-3}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-7} \div 10$  л мкм рт. ст./с) характеризуется преимущественно вязкостным характером течения газа. Вязкость гелиево-воздушной смеси определяет общий поток газов, а изменение потока гелия во времени за счет диффузионного обеднения концентрации гелия в баллоне можно считать несущественным.

- Во многих случаях калибровка контрольных течей производится при одной концентрации гелия в смеси, а для подгонки величины потока гелия используют другую концентрацию пробного газа в баллоне. Так как вязкость гелия очень близка к вязкости воздуха (всего на 4% выше), то изменение концентрации гелия в баллоне после калибровки или в процессе эксплуатации в несколько раз практически не влияет на общий поток гелиево-воздушной смеси (ГВС) через капиллярную течь. При этом, расчёт потока гелия допустимо вычислять пропорционально его объёмной концентрации в ГВС.

- Проблема засорения капиллярной контрольной течи посторонними частицами существует. Но, как показывает практика, такие случаи встречаются достаточно редко. Учитывая, что диаметр капилляра в формулах Пуазейля стоит в 4 степени ( $d^4$ ), следует ожидать, в диапазоне потоков  $10^{-11} \div 10^{-3}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-7} \div 10$  л мкм рт. ст./с), использование капилляров с диаметром канала порядка  $3 \div 30$  мкм. Таким образом, если газы, заправляемые в контрольную течь, будут проходить 2-х мкм фильтр, то проблема будет не так остра. Необходимо ориентировать капилляр узкой частью в баллон, а широкой – на вход проверяемой системы, тогда частицы, прошедшие устье течи, в дальнейшем в канале задержаны не будут. Проблема также осложняется тем, что включения, попадающие в баллон течи с контрольным газом, как правило, прилипают к стенкам баллона с адсорбированными слоями воды и по баллону не мигрируют.

## Заключение

На стабильность потока газа через капилляр существенно влияет только снижение давления в баллоне за счёт уноса части газа из баллона через течь. Допустимое падение давления без коррекции нормированной величины потока составляет 2,5 %.

Отсюда легко рассчитать необходимый объём баллона (на единицу потока при заданном давлении), периодичность калибровки и срок эксплуатации. При этом начальную точку калибровочного графика по потоку можно принять на 5% ниже, а конечную точку взять выше на 5% и, таким образом, получить допустимое изменение давления 5% в пределах допустимых погрешностей по потоку  $\pm 5\%$ .

Согласно ОСТ 92-1527-89 при испытаниях объектов на герметичность поток пробного газа от эталонной контрольной течи  $Q_{кт}$  (по которой калибруется схема испытаний) может отличаться от измеряемого потока пробного газа на изделии  $Q_i$  не более чем в 10 раз:

$$0,1 Q_{кт} > Q_i > 10 Q_{кт} \quad (1)$$

Контрольные течи Гелит-1 и Гелит-2 выпускаются с диапазоном потоков гелия  $10^{-9} \div 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-5} \div 10^{-4}$  л мкм рт. ст./с), что обеспечивает при вакуумных испытаниях идентификацию течей на изделии  $Q_i$  в диапазоне  $10^{-10} \div 10^{-6} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-6} \div 10^{-2}$  л мкм рт. ст./с)

Сохраняется острая потребность в выпуске вакуумных контрольных течей на другие диапазоны и пробные газы, а также контрольных течей для атмосферных испытаний ранее обозначенной номенклатуры. Наиболее удачным решением следует считать выпуск следующей линейки контрольных течей указанных типов в заданном диапазоне, отличающихся друг от друга примерно на порядок:  $10^{-11}$ ,  $10^{-10}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-8}$ ,  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , 1,0, 10 л мкм рт. ст./с). Выпуск регулируемых давлением контрольных течей ТК(с)Р представляет интерес, главным образом, в области больших потоков  $10^{-2} \div 10$  л мкм рт. ст./с, когда используются достаточно большие запасы контрольного газа и можно установить редуктор и измеритель давления.

В развитие стандарта ОСТ 92-2125-87 ФГУП «НПО «Техномаш» разработана следующая линейка вакуумных контрольных течей «Гелийном» со стеклянным капилляром (ТКс) в диапазоне потоков  $10^{-11} \div 10^{-7} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-7} \div 10^{-3}$  л мкм рт. ст./с).

- «Гелийном В7», с потоком гелия порядка  $10^{-11} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-7}$  л мкм рт. ст./с);
- «Гелийном В6», с потоком гелия порядка  $10^{-10} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-6}$  л мкм рт. ст./с);
- «Гелийном В5», с потоком гелия порядка  $10^{-9} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-5}$  л мкм рт. ст./с);
- «Гелийном В4», с потоком гелия порядка  $10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-4}$  л мкм рт. ст./с);
- «Гелийном В3», с потоком гелия порядка  $10^{-7} \text{ м}^3\text{Па/с}$  ( $10^{-3}$  л мкм рт. ст./с).

Общая длина контрольной течи 300 мм, диаметр баллона 70 мм. Погрешность калибровки течей не более  $\pm 10\%$ , а срок эксплуатации определяется временем работы под вакуумом и составляет не менее 12 месяцев.

Изготовление капиллярных контрольных течей сводится к оттяжке стеклянного капилляра заданной проводимости из подходящей промышленной заготовки. До последнего времени в промышленности использовались капиллярные трубки от термометра, которые изготавливаются по ГОСТ 1224-71.

Оттяжка капилляров для контрольных течей не представляет большой сложности, но выход годных экземпляров для использования в реальных контрольных течах, весьма невелик. Стеклянных капилляров с внутренним диаметром канала  $3 \div 30$  мкм никто не предлагает, поэтому приходится приобретать капиллярные трубки большей проводимости и оттягивать их (уменьшать диаметр) при температуре плавления стекла до нужного диаметра. В качестве нагревателя используется нихромовая спираль, нагреваемая электрическим током до нужной температуры, так как пользоваться открытым пламенем в метрологических лабораториях предприятий запрещено. Распространение получили капиллярные трубки от градусников треугольного профиля с внедренной жёлтой отражательной полоской. Эти трубки имеют небольшое соотношение внешнего и внутреннего диаметров, поэтому их приходится оттягивать до размеров по внешнему диаметру до  $0,05 \div 0,1$  мм. При изготовлении контрольных течей с фторопластовым или резиновым герметизирующим уплотнением повторное введение треугольного капилляра в обжатое уплотнение крайне затруднительно. Герметизацию изготовленного капилляра в корпусе течи лучше производить с помощью фторопластовой шайбы, обращённой в сторону вакуума, с дополнительным эластичным подпружинивающим элементом (резина, пластик), направленным в сторону баллона.

Наиболее подходящим полуфабрикатом для изготовления контрольных течей «Гелийном» всех диапазонов являются капиллярные трубки ООО «ТОСС» (г. Саратов), изготавливаемые по ОСТ 11 ПО.735.000, с внешним диаметром 3 мм, а внутренним диаметром 40 мкм. Это удовольствие довольно дорогое, но оно этого стоит. Капилляры имеют цилиндрическую форму с приемлемым внешним диаметром, соотношение внешнего диаметра к внутреннему диаметру составляет 75. Это позволяет при наружном диаметре оттянутого капилляра порядка 0,4 мм иметь его внутренний диаметр примерно 5 мкм. Значительно увеличивается выход годных капилляров заданной проводимости. Тонкие концы капилляров контрольных течей становятся толще и, поэтому, они более устойчивы к ударным нагрузкам. Диапазон потоков готовых контрольных течей, легко изготавливаемых из таких капилляров, перекрывает все необходимые величины. Несмотря на то, что основная погрешность калибровки потока гелия от течи также не превышает  $\pm 10\%$ , такие контрольные течи, по-прежнему, пока, остаются отраслевыми мерами потока с ведомственной аттестацией и поверкой.

Разработку атмосферных контрольных течей для локальных способов контроля герметичности («Гелийном А6», Гелийном А5» и «Гелийном А4») с теми же капиллярами планируется осуществить, прежде всего, в диапазо-



не потоков гелия  $10^{-10}$ – $10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/с ( $10^{-6}$ – $10^{-4}$  л мкм рт. ст./с), что соответствует современным потребностям локальных методов контроля герметичности.

**Разработка современных методик госповерки всей номенклатуры изготавливаемых гелиевых течей дело недалёкого будущего. Новые течеискатели и контрольные течи с улучшенными метрологическими характеристиками закроют все текущие вопросы и придадут новый импульс технологической науке в РКП.**

#### Список литературы

1. Барченко В.Т., Виноградов М.Л. Анализ потребности предприятий в гелиевых масс-спектрометрических течеискателях. Вакуумная техника и технология. 2014. Том 24. №1, СПб: ЛЭТИ.
2. Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Сумкин П.С. Течеискиание. Уч. Пособие. М.: Спектр, 2011.

3. Клочков А.В., Тагиров М.С. Современные методы поиска негерметичностей вакуумных и криогенных систем. Казанский федеральный университет. Институт физики. Издание репринтное. 2013.

4. Козлов Н.И. Масс-спектрометрические гелиевые течеискатели НПФ «Прогресс». Особенности, перспективы, развития. Январь 2016. www.npf-progress.ru

5. Кологов А.В., Соловьев В.Н., Барышников В.И. Исторические аспекты применения единиц измерений в гелиевом течеискиании. НТБ Вестник НПО «Техномаш» №3, с.32.

6. Мясников В.М., Виноградов С.В., Лобаев А.Н., Тараненко Е.В. влияние параметров вакуумной системы течеискателя на характер изменения давления пробного газа в масс-спектрометрическом анализаторе. Дзержинский политехнический институт. НГТУ им. Р.Е. Алексева. Издание репринтное 2015.

## ◆ ТЕХНОЛОГИИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РКТ

УДК 658.562.3: 629.78

*Бараев А.В., Илингина А.В., Рябчиков П.В.*

### Новые цифровые технологии контроля в производстве изделий РКТ

В статье обсуждаются цели и задачи внедрения методов фото- и видеофиксации результатов контроля в производстве изделий ракетно-космической техники и содержание проекта корпоративного Стандарта в данной области.

**Ключевые слова:** фотофиксация, видеофиксация, автоматизированные системы регистрации и архивирования результатов контроля.

Одним из перспективных современных методов объективного контроля качества выполнения технологических операций, является их фото- и видеофиксация с применением специальных автоматизированных систем регистрации и архивирования результатов контроля.

Методы фото- и видеодокументирования технологических операций могут применяться практически на всех этапах производственного процесса изготовления изделий для получения и последующего цифрового хранения достоверного изображения объекта съемки при выполнении контрольной операции.

В последние годы ФГУП «НПО «Техномаш» осуществлен ряд организационно-практических мероприятий по реализации и научно-техническому сопровождению данных технологий в производстве изделий РКТ, разработан проект корпоративного стандарта «Организация и проведение фото- (видео-) документирования с целью регистрации результатов выполнения операций, влияющих на функционирование изделий РКТ» [1].

Проект [1] подробно описывает:

1. Цели и задачи проведения фото- и видеофиксации выполнения технологических переходов (результатов выполнения), применительно к основным производственным технологическим процессам и операциям.

2. Определение видов и задач фото- и видеодокументирования:

- непрерывная видеофиксация процесса;
- фотофиксация выполненной операции (перехода);
- фотофиксация внутренних полостей на предмет отсутствия внутренних загрязнений;
- фотофиксация допущенных отступлений и выявленных несоответствий;
- видеофиксация (фотография рабочего дня) в целях подтверждения (установления) нормативов норм времени;
- видеофиксация длительных критичных процессов.

3. Порядок назначения в технологические процессы фото- и видеоконтроля (на этапе разработки конструкторской документации и внедрения данных контрольных операций в действующие ТП).

4. Рекомендации по выбору аппаратных устройств и средств фото/видеофиксации;

5. Порядок назначения ответственных лиц, проведение процедуры, хранение, получение аппаратуры и использование оборудования.

6. Методику проведения работ, включая рекомендации по выбору экспозиции, требования по идентификации фиксируемого процесса, изделия, даты и времени выполнения операции.



7. Порядок оценки результатов фото/видео документирования.

8. Рекомендации по обучению и аттестации персонала, задействованного в процедуре фото- и видеофиксации.

9. Процедуры применения фото- и видеофиксации при необходимости обеспечения государственной тайны.

При разработке стандарта были учтены требования действующей нормативной документации, применяемой в Российской Федерации, опыт по использованию фото- и видеодокументирования ведущих российских компаний и корпораций, например, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

(Ростехнадзор), Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Также был использован опыт корпорации Boeing.

Внедрение корпоративного стандарта обеспечит введение единых требований по проведению фото- и видеофиксации, позволит унифицировать инструкции и проекты стандартов, разрабатывавшихся российскими предприятиями РКП самостоятельно, без учета опыта головных научно-исследовательской организаций Госкорпорации «Роскосмос».

Выполнение операций с применением методов фото- и видеофиксации процесса является серьезной мотиваци-

Наименование	Примечание
Контроль параметров взаимного расположения элементов, по которым имеются конкретные требования в КД	Совмещение рисков ДСЕ при сборке, положение и установка кронштейнов, затяжка резьбовых соединений и пр.
Операции контроля пространственной ориентации сборочных единиц, агрегатов, приборов, положение которых влияет на функционирование изделия	Правильность установки датчиков, измерительной аппаратуры
Результаты контролки и пломбировки приборов и агрегатов, определяющих работоспособность изделия (приборы систем управления, элементы управления двигателем, гидросистем и др.)	
Настройка агрегатов регулирования (дрессель, регулятор) после контрольно-технологических испытаний двигателя в части установки по лимбам	
Соответствие маркировки сочлененных электросоединителей	Взаимное расположение элементов БКС и соединителей
Подсоединение перемычек металлизации с идентификацией металлизированных элементов	
Демонтаж технологических заглушек, приспособлений и предохранительных колпачков	
Результаты дефектации после проведения испытаний узлов и элементов конструкции, которые подвергаются осмотру в соответствии в конструкторской и технологической документацией	
Допущенные дефекты (забоины, риски и т.д.) находящиеся за пределами требований КД, которые допускается устранять доработкой до их устранения	
Взведенное состояние фиксаторов раскрывающихся элементов	
Моменты затяжки резьбовых соединений в процессе затяжки	До перехода на цифровые моментные ключи



онной составляющей для его исполнителя, т.е. выполнить работу с высоким уровнем качества, не допустить возможность возникновения несоответствия. Введение процессов фото- и видеодокументирования повысит ответственность работников, осуществляющих контроль операций.

Внедрение проекта стандарта «Организация и проведение фото- (видео-) документирования с целью регистрации результатов выполнения операций, влияющих на функционирование изделий РКТ» является составной частью Плана реализации в 2017–2019 годах Стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», целью раздела 1.7.1 которого является обеспечение контроля выполнения 100% особо ответственных и критичных операций с использованием методов фото- и видеофиксации.

На основании анализа комплектов конструкторской и технологической документации на двигатели 8Д411К/412К, 8Д49, 11Д55, 11Д58М, РД0124А/14Д23 разработаны «Рекомендации по технологическим операциям изготовления ЖРД 8Д411К/412К, 8Д49, 11Д55, 11Д58М, РД0124А/14Д23 с использованием методов объективного

контроля (фото- и видеофиксация) и применением автоматизированных, регистрирующих параметры систем». Рекомендуемый перечень таких операций представлен ниже.

В 2016–2017 гг. на таких предприятиях РКТ как АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», «ВМЗ»–филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», АО «КБХА», АО «РКЦ Прогресс» и ряде других технологии фотодокументирования внедрены более чем для 12000 особо ответственных технологических операций. Наилучшие показатели по его внедрению достигнуты на предприятиях, входящих в структуру АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», тогда как на АО «НПО «Энергомаш», «Корпорация «ВНИИЭМ» данный вид технологий объективного контроля используется менее, чем на 20% критических операциях. На ряде предприятий отрасли в КД на изделия требований к фото/видеофиксации производственных процессов не предъявляются и фото/видеофиксация практически не используется.

В качестве примера приведем рекомендуемую структуру соответствующего производственного технологического процесса:

Утверждаю

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

Согласовано

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

### Технологический процесс

«Проведение фотодокументирования  
контрольных технологических операций (КТО)  
при изготовлении и сборке двигателя \_\_\_\_\_»

Цель проведения фотосъёмки: фотодокументирование операций, выполняемых при изготовлении и сборке двигателя \_\_\_\_\_

Руководящий документ: технологическая инструкция о порядке проведения работ по фотодокументированию № \_\_\_\_\_

Объем фотоматериалов: 100% операций, определенных перечнем КТО, для контроля путём фотодокументирования при изготовлении и сборке двигателя \_\_\_\_\_ в соответствии с производственным планом текущего года.

Состав съёмочной группы: работники цеха, имеющие утверждённое разрешение на использование средств сбора и хранения информации, назначенные распоряжением по цеху.

Время проведения фотосъёмки: с момента выполнения первой КТО до завершения технологического процесса.

Ответственный за проведение фотосъёмки: \_\_\_\_\_.

Начальник цеха \_\_\_\_\_.

Наименование изделия	Наименование операции	Номер цеха (отдела) и место проведения фотосъёмки	Примечание
Сборка (черт. _____) изделия (_____)	Контровка гайки поз. 15 в уплотнение кернением в резьбу в двух диаметрально-противоположных местах	Цех № _____ (участок сборки)	Состав участников (согласно распоряжению)
	Контровка гайки поз. 12 в корпусе кернением в резьбу в двух диаметрально-противоположных местах		
	(и т.д.)		



В настоящее время в целях совершенствования как непосредственно технологий фото- и видеодокументирования, так и дальнейшего развития отраслевой нормативно-технической базы в части внедрения таких технологий, проводится мониторинг мероприятий по реализации процедур фото- и видеоконтроля, цифрового документирования результатов соответствующих операций более чем на 20-ти предприятиях отрасли – изготовителях из-

делий РКТ (СВ, КА, НКИ) и их составных частей (кроме, элементов бортовых и телеметрических систем).

#### Список литературы

Стандарт. Организация и проведение фото- (видео-) документирования с целью регистрации результатов выполнения операций, влияющих на функционирование изделий РКТ (проект). ФГУП «НПО «Техномаш». 2017.

УДК 629.7:658.5:004

Семенов В.В., Цырков А.В., Юрцев Е.С.

### «Индустрия 4.0» – новое в управлении жизненным циклом продукции

«Индустрия 4.0» – так классифицирована текущая концепция автоматизации и обмена данными в технологии производства, ключевыми факторами которой определены:

1. Управление жизненным циклом изделия (PLM – Product Lifecycle Management).

2. Большие Данные (Big Data) производственных систем, количество которых лавинообразно возрастает, а рациональное управление и анализ которых является одной из основных наиважнейших задач организации производства.

3. Умный завод (SMART Factory) – концепция, определяющая бесшовное соединение отдельных этапов проектно-производственного процесса, от стадии проектирования изделий и планирования использования производственных ресурсов до изготовления, на основе применения адаптивных когнитивных систем.

4. Киберфизические системы (Cyber-physical systems) – это концепция управления информационными потоками, интегрирующая вычислительные ресурсы и коммуникационные потоки в физические процессы производства на протяжении всего жизненного цикла изделия.

5. Интернет-вещей (IoT – Internet of Things) – концепция построения вычислительной сети физических предметов, оснащённых встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, исключающая из части действий и операций необходимость участия человека.

6. Интероперабельность (Interoperability) – функциональная совместимость, являющаяся наиважнейшим фактором промышленной концепции «Industry 4.0», без которой невозможно построить бизнес-модель единой работоспособной интегрированной производственной системы.

В развитие концепции управления жизненным циклом изделий, принятой разработчиками PLM-систем, основанной на принципе дуализма «объект-операция/физическое-информационное», отражающей желание достичь взаимно однозначного соответствия между физическим и информационным пространством, предлагается решение

по управлению сквозными процессами создания новых и изготовлению существующих изделий.

Новое решение нашло реализацию в системе проектно-производственного сопровождения (СППС, [1]) и является разработкой, объединяющей программно-методические средства управления жизненным циклом (ЖЦ) технической системы. СППС организует взаимодействие с *PLM* и *ERP* системами. Методические решения системы обеспечивают органичное сопряжение с функционалами действующих на предприятии систем: *PLM* – по управлению составом изделия; *ERP* – по учёту и отчётности в хозяйственной деятельности.

При разработке методов планирования и управления, реализованных в системе, преследовались цели:

- сокращения сроков создания изделий;
- минимизации потерь при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), а также серийного производства;
- балансировки трудовых ресурсов в процессах создания (разработки и изготовления) технических систем;
- унификации методов поддержки изделий в эксплуатации;
- сокращения затрат на эксплуатацию СППС.

Система построена на основе общей концепции сквозного управления процессами ЖЦ и методологии проектно-операционного управления (ПОУ).

*PLM* системы для управления процессами используют методы *PM* (*Project Management*) на основе модели потока работ (*Work Flow – WF*). *ERP* системы в управлении производством базируются на положениях об операционной деятельности в соответствии со стандартами группы *MRP-II*. В основе алгоритмов СППС по управлению и балансировке ресурсов предприятия лежат идеи СПО (синхронного планирования и оптимизации). Идеи СПО обобщают методы *APS* (*Advanced Planning and Scheduling*). Считается, что методы *APS* при интеграции с *ERP*-системой добавляет производственному предприятию возможность более быстрого реагирования на изменения внешней среды и внутреннего состояния производства (рис. 1). Системы *APS/СПО* возникли в результате эволюции методов и систем производственного управления.

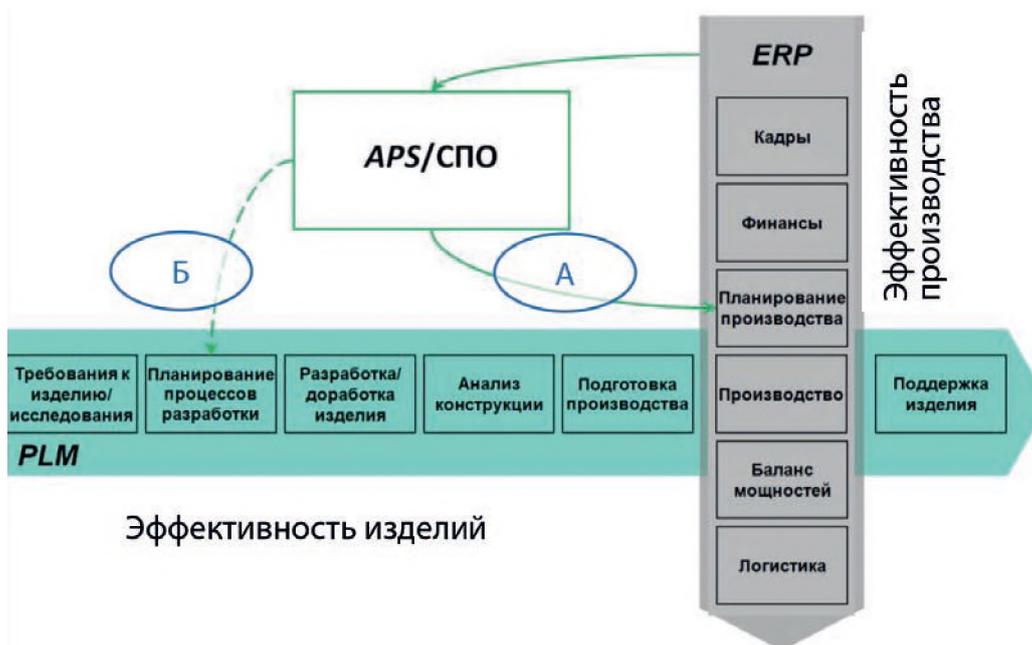


Рис. 1. Концептуальная схема развития взаимодействия между PLM и ERP

СППС является примером функционала, развивающего идеи СПО (рис. 1) и объединяющего методы управления проектной и производственной (операционной) деятельностью. СППС осуществляет сквозное планирование процессов и распространяет управляющие воздействия в сферах проектно-конструкторской деятельности, технологической и логистической подготовки производства, изготовления и эксплуатации СТС.

Организационно-методическая модель СППС содержит ключевые высокоуровневые бизнес-потоки (БП): сопровождение разработки; подготовка схмотехнических

решений; расчёт плана; управление процессами; мониторинг процессов.

Планирование и последующие управление и мониторинг процессов создания СТС проводятся на принципах организации бережливого производства. Планировщик процессов формирует общий поток работ, объединяя объекты опытного и серийного производства. Результатом расчёта является базовый план (рис. 2), объединяющий работы различных подразделений: А – конструкторских, Б – логистических, В – технологических, Г – производственных. В зависимости от особенностей изделия (проекта) и

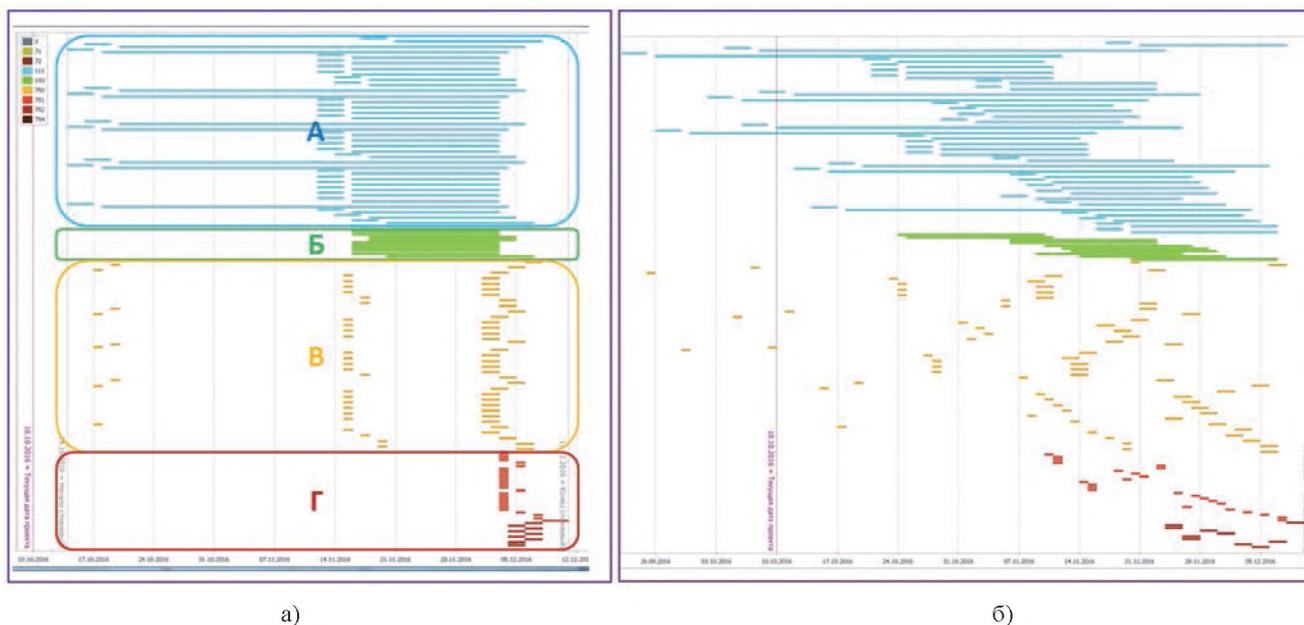


Рис. 2. Цикловой график работ:  
а) исходное состояние плана; б) сбалансированное состояние плана



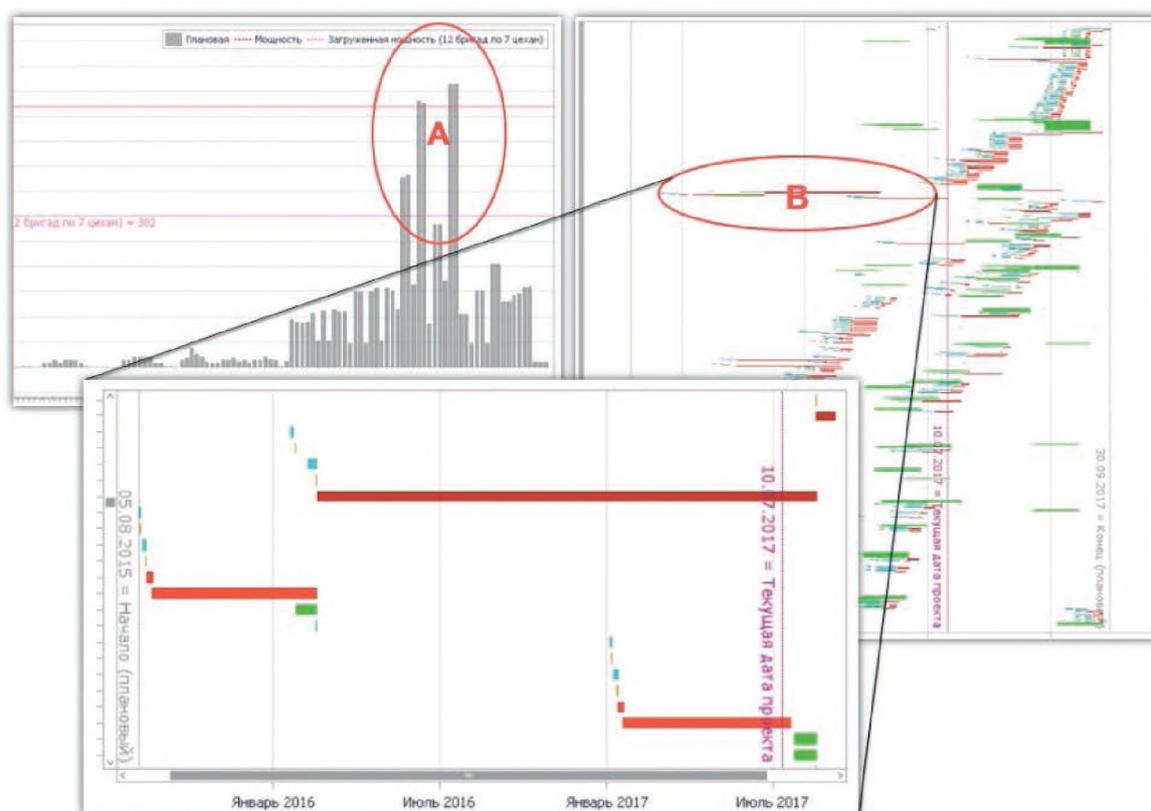
состояния проектно-производственной среды предприятия, загрузка подразделений работами конкретного проекта может быть различна, но, как правило, в исходном состоянии плана, наблюдается неравномерность загрузки по различным направлениям деятельности (рис. 3а).

В основе базового плана может лежать представление изделий как на уровне конструкторского, так и технологического состава.

Модуль планирования стремится оптимизировать загрузку ресурсов предприятия, используя в качестве критерия величину «незавершенного производства и разработки». Перегрузки отдельных подразделений приводят к изменению сроков (графиков) работы всех подразде-

лений, функционально связанных по этапам жизненного цикла (рис. 2б). Таким образом, технологические и логистические решения могут влиять на очередность выполнения проектных и конструкторских работ.

Особенности НИОКР вынуждают при моделировании процессов использовать статистическую и экспертную информацию по изделиям-прототипам. Использование статистических решений (данных) может приводить к возникновению результатов, подобных показанным на рис. 3. Здесь область А свидетельствует о неадекватности применения прототипа функционально-организационного решения (ФОР) с точки зрения доступности ресурсов, а область В – корректности производственно-технологиче-



а)

б)



в)

Рис. 3. Организационно-технические ограничения:  
а) организационные; б) технические (технологические); в) загрузка подразделений после корректировки ФОР



ских характеристик. В таких ситуациях СППС представляет возможность корректировки решения по схемотехническим данным. Результат корректировки приведён на рис. 3в. Автоматизированный поиск подобных «исключений» по используемым ресурсам является одной из задач анализа плана.

Теория ограничений исходит из того, что любое предприятие как система имеет некоторое количество элементов, которые в конкретный момент времени отвечают за её эффективность, а точнее ограничивают достижение максимальной результативности. Таким элементом является элемент потока работ, т.е. состав определённых действий, связанных с ресурсами предприятия. Как правило, это один или ограниченная группа элементов, они и являются ограничениями системы. Задача состоит в нахождении этих элементов, управляя которыми, можно влиять на результативность системы.

В СППС предлагается ряд механизмов анализа потока работ, поиска и устранения ограничений. Основными признаками для поиска ограничений являются существенные отклонения в диаграммах загрузки (рис. 3а) и цикловых графиках работ (рис. 3б). Анализ отклонений позволяет определить элементы, дестабилизирующие поток работ; элементы, являющиеся в данный момент организационно-техническими ограничениями, приводят к отклонениям от желаемой цели по срокам и затратам (стоимости) проектно-производственной программы.

Новизна идеи создания СППС состоит в построении объединённых (сквозных) процессов сопровождения жизненного цикла изделия и объединении функционалов планирования и управления потоками работ, которыми традиционно управляют *PLM* и *ERP* комплексы.

Сокращение цикла создания новых изделий достигается за счёт «сквозного» моделирования процессов по всему ЖЦ, исключения лишних «буферов», формирования каждой из используемых систем при планировании, и исключения необходимости согласования планов между проектными, технологическими и МТС (логистическими) службами.

Методология ПОУ позволяет применять унифицированные методы при поддержке изделий в эксплуатации, решая задачи управления регламентными работами и управления по контролю за техническим состоянием изделия.

Объединение и унификация управляющих компонент *PLM* и *ERP* комплексов позволяют сократить затраты на обучение персонала, построение и поддержку *IT*-инфраструктуры. Сокращение затрат на эксплуатацию СППС достигается также за счёт автоматизации процессов подготовки данных для решения задач управления на основе использования проектно-производственных баз знаний.

#### Список литературы

1. Лопота А.В., Цырков А.В., Цырков Г.А. Реализация системы проектно-операционного управления предприятием. Организационно-методические решения// Информационные технологии в проектировании и производстве / НТЖ ФГУП «ВИМИ», 2016. № 3. С. 9–17.
2. Цырков А.В. Структурно-параметрический моделиер – основа построения комплексных информационных моделей производственных систем. Информационные технологии в проектировании и производстве / НТЖ ФГУП «ВИМИ», 2005. №1. С. 51–58.

## ◆ ЭЛЕКТРОННАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

УДК 629.7:004

Баравев А.В., Должанский Ю.М., Илингина А.В., Кочкин Е.В.,  
Матвеев Е.В., Степанов В.В., Любченко В.А.

### Информационные электронные паспорта на технологии и специальное оборудование, разработанные ФГУП «НПО «Техномаш» в 2017 году

В статье приведён перечень электронных информационных паспортов на технологии и специальное технологическое оборудование для машиностроительного и двигательного производств ракетно-космической промышленности, а также примеры таких паспортов.

**Ключевые слова:** технология, оборудование, гибка труб, электронно-лучевая сварка, гальванические покрытия, производственный контроль, мехатронные технологии, машинное зрение, балансировка,

В продолжение оперативного информирования предприятий отрасли сведениями о новых разработках ФГУП «НПО «Техномаш» в части новых технологий и специального оборудования для машиностроительного и двигатель-

ного производств ракетно-космической промышленности (РКП) приведена сводная таблица технологий и специального технологического оборудования, на которые оформлены информационные электронные паспорта в 2017 году.



**Таблица 1 – Технологии и оборудование, паспортизированные в 2017 году**

№ № паспорта	наименование технологии (оборудования)
<i>сварочное производство, пайка</i>	
<i>П187/15/17</i>	Установка для электронно-лучевой сварки в общем вакууме ДСЕ изделий РКТ
<i>Технологии и оборудование нанесения специальных покрытий</i>	
<i>П214/17</i>	Технология гальванического нанесения толстослойных никель-хромовых покрытий на ДСЕ ЖРД сложного профиля
<i>П215/17</i>	Технология гальванического нанесения теплозащитных покрытий на ДСЕ ЖРД
<i>производственный контроль и испытания</i>	
<i>П199/17</i>	Комплекс оборудования для автоматизированного оптического контроля толщины стенок сопел после ротационной вытяжки и фрезерования ребер ЖРД типа 14Д23
<i>П205/17</i>	Оборудование для контроля качества сварных соединений ДСЕ ЖРД
<i>П217/17</i>	Оборудование для радиометрического контроля толщины специальных покрытий ДСЕ ЖРД
<i>П218/17</i>	Оборудование для автоматизированного рентгенофлуоресцентного контроля толщины серебряных покрытий на оребренных поверхностях ДСЕ ЖРД
<i>П221/17</i>	Оборудование для контроля качества конструкционных покрытий, в том числе, в труднодоступных местах КС ЖРД
<i>П224/17</i>	Оборудование для неразрушающего контроля паяных соединений ДСЕ ЖРД
<i>П225/17</i>	Аппаратура нового поколения для неразрушающего контроля ДСЕ ЖРД методами мехатронных технологий
<i>П226/17</i>	Оборудование для неразрушающего контроля ДСЕ РКТ методами интеллектуального машинного зрения
<i>специальное технологическое оборудование</i>	
<i>П206/17</i>	Автоматизированный механообрабатывающий комплекс для фрезерования каналов охлаждения на крупногабаритных криволинейных деталях диаметром до 2500 мм
<i>П207/17</i>	Автоматизированный стенд МЦМ 6000 для высокоточной статической балансировки КА и другой полезной нагрузки массой до 6000 кг перспективных изделий РКТ
<i>П208/17</i>	Автоматизированный стенд СМИ1000 для определения моментов инерции КА и другой полезной нагрузки массой до 1000 кг перспективных изделий РКТ
<i>П209/17</i>	Установка УПТТ-8 для пайки тонкостенных трубопроводов
<i>П222/17</i>	Автоматизированный измерительный комплекс АСБЖРД для высокоточной статической балансировки ЖРД и контроля геометрических параметров сопел
<i>П227/17</i>	Балансировочный станок ВДСИГП с системой измерения геометрии наружного обвода для выходного контроля головных частей изделий РКТ
<i>П228/17</i>	Специальное технологическое оборудование для гибки тонкостенных труб прямоугольного сечения

Ниже приведена основная информация двух разработанных (дополненных) в 2017 году паспортов.

### ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ 207/17

**Автоматизированный стенд МЦМ 6000 для высокоточной статической балансировки КА и другой полезной нагрузки изделий РКТ массой до 6000 кг**

Вид продукции: оборудование.

Вид производства: контроль выходных параметров изделий

Технологический процесс: статическая балансировка.

Область применения: изготовление КА и изделий полезной нагрузки РКТ

Заказчик: АО «ИСС им. академика М.Ф.Решетнева

(договор от 03.03.2015 №15-0303)

Отраслевая значимость оборудования: базовое

Класс оборудования: отраслевое.

сроки выполнения работ: 2015–2017

Разработчик, изготовитель и поставщик оборудования:  
ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва,  
127018, Россия

Стадия разработки: опытный образец.

Фактическое нахождение: АО «ИСС им. академика  
М.Ф.Решетнева»

Общие сведения (описание, характерные особенности  
и новации, фото и т. д.):

Стенд МЦМ 6000 (рис. 1) предназначен для определе-  
ния массы и координат центра масс КА и блоков полезной  
нагрузки (головных частей) изделий РКТ.

Стенд работает по принципу уравнивания накло-  
на изделия относительно горизонтальной оси.

Основными конструктивными узлами стенда являются:

1. Платформа установки и закрепления изделия.

2. Рабочий поворотный стол стенда.

3. Поворотное устройство с датчиками угла наклона  
стола.

4. Домкрат наклона рабочего стола.

5. Эталонный груз для измерения массы.

Наличие аналогов

в России: стенд АМИК (ФГУП «НПО «Техномаш», 2013)

за рубежом: нет.

Основные технические характеристики:

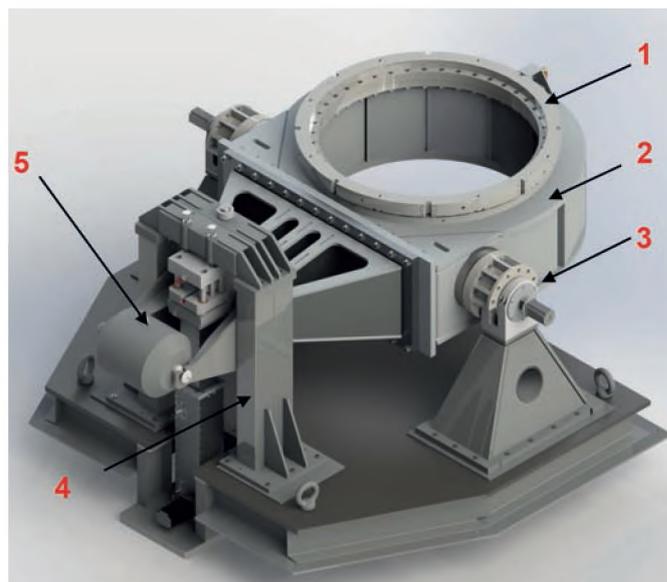


Рис. 1. Общий вид стенда МЦМ 6000

Основные сравнительные характеристики	МСМ 6000	АМИК
– диапазон масс контролируемых изделий, кг	600–6000	300–3000
– погрешность определения массы изделия, кг	± 3,0	± 1,5
– диапазон определяемых координат центра масс, мм:		
– вертикальных	1000–4000	500–1500
– горизонтальных	100	100
– погрешность определения координат центра масс, мм		
– вертикальных	± 1,5	± 1,0
– горизонтальных	± 0,5	± 0,4
– максимальный угол наклона платформы, угл. град.	20	20
– питание, ВхГц	220х50	220х50
– потребляемая мощность, ВА, не более	2000	1500
– габариты стенда, мм:	3170х2468х1762	2480х2150х1630
– масса стенда (с опорной плитой), кг, не более	5850	3750

Документация (технологические процессы, технические условия и т.п.):

КД ТМКБ.6.51.233.00.00.000СБ

Руководство по эксплуатации ТМКБ.6.51.233.00.00.000РЭ

Формуляр ТМКБ.6.51.233.00.00.000ФО

Рынок конкурентоспособности вновь продукции – рынок России

Предприятия, на которых планируется внедрение технологии (оборудования)

Название предприятия	Год начала использования оборудования	Изделия, для изготовления которых используется оборудование
АО «ИСС им. академика М.Ф.Решетнева»	2017	(универсальное оборудование)

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ 209/17

### Установка УПТТ-8 для пайки тонкостенных трубопроводов

Вид продукции: оборудование.

Вид производства: пайка

Технологический процесс: пайка тонкостенных трубопроводов.

Область применения: изготовление трубопроводных систем изделий РКТ.

Инициативная разработка ФГУП «НПО «Техномаш».

Отраслевая значимость оборудования: базовое

Класс оборудования: межотраслевое (универсальное).

сроки выполнения работ: 2015–2016

Разработчик, изготовитель и поставщик оборудования:

ФГУП «НПО «Техномаш»

3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, а/я 131, Москва 127018, Россия

Стадия разработки: опытный образец.

Фактическое нахождение: ФГУП «НПО «Техномаш»

Общие сведения (описание, характерные особенности и новации, фото и т. д.):

Установка модели УПТТ-8 предназначена для высокотемпературной пайки неповоротных соединений стальных трубопроводов с арматурой низкого и высокого давления в защитной среде (в аргоне).

Режим работы установки – полуавтоматический, с видеоконтролем и видеозаписью процесса пайки, с автоматическим управлением защитной средой и охлаждением.

Нагрев соединения трубопроводов для пайки осуществляется в ручном или автоматическом режимах в специальном блоке – разъёмном нагревательном устройстве типа НРТ – излучением резистивного нагревательного элемента (ниобий), питающимся от однофазного понижающего трансформатора с водоохлаждаемыми обмотками и тиристорным регулятором тока.

Автоматическое управление защитной средой предусматривает режимы предварительной продувки, поддержания необходимого расхода аргона в камере пайки и полости паяемого трубопровода и отключения подачи аргона.

В качестве регулирующего устройства используется регулятор расхода газа РРГ (ООО «Элточприбор»).

Повторяемость режимов нагрева обеспечивается контролем и автоматическим управлением мощностью нагрева; система контроля и автоматического управления мощностью разработана на базе измерительного контроллера МС20 (ОАО «МЗТА») и измерителей переменного тока и напряжения ДТХ (ФГУП НИИ электромеханики, НИИЭМ); контроллер также управляет охлаждением силового трансформатора, кабелей, нагревательного устройства и параметрами защитной среды.

Настройка программы нагрева и управление процессом пайки осуществляется с помощью сенсорной графической панели, при этом предусмотрена выносная кнопка дистанционного управления запуском процесса пайки и отключением нагрева.

Видеонаблюдение и видеозапись обеспечивает объективный контроль и регистрацию процессов расплавления и растекания припоя с возможностью применения для этих целей до четырёх видеокамер.

Все комплектующие установки соответствуют российским или международным стандартам. В комплект документации на установку входит декларация изготовителя о ее соответствии нормам технического регламента о безопасности машин и оборудования.

Общий вид опытного образца установки представлен на рис. 2.

На рис. 3 а) и б) приведены общий вид и микрорелиеф спаяного макетного образца.



а)

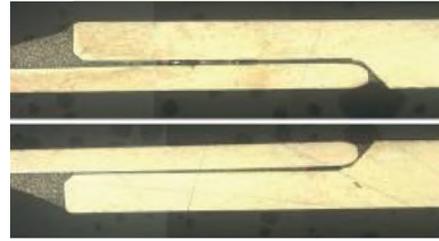


б)

Рис. 2. Опытный образец установки УПТТ-8:  
а) шкаф управления;  
б) нагревательное устройство, видеокамера и монитор видеоконтроля



а)



б)

Рис. 3. Паяный макетный образец (сталь 12Х18Н10Т)

- а) общий вид паяного макетного образца;  
б) микрошлиф паяного макетного образца

## Сведения об аналогах

- в России: УПТТ-1 (ФГУП «НПО «Техномаш», 2013)
- за рубежом: сведений об аналогах нет

## Общие технические характеристики:

основные сравнительные характеристики	УПТТ-8	УПТТ-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>– параметры паяемых труб: мм <ul style="list-style-type: none"> <li>– диаметр</li> <li>– толщина стенок</li> </ul> </li> <li>– тип переналаживаемого нагревательного устройства (НУ)</li> <li>– максимальная температура нагрева соединения, °С</li> <li>– время нагрева соединения до максимальной температуры, мин</li> <li>– среда в рабочем пространстве нагревательного устройства</li> <li>– режим нагрева</li> <li>– режим работы</li> <li>– напряжение питающей сети, В</li> <li>– установленная мощность, кВА</li> <li>– напряжение на выходе установки (на нагревательном устройстве), В, не более</li> <li>– габаритные размеры, мм: <ul style="list-style-type: none"> <li>– шкафа управления</li> <li>– нагревательного устройства</li> </ul> </li> <li>– масса установки, кг</li> <li>– площадь размещения комплекта оборудования (без стола для пайки), м<sup>2</sup></li> </ul>	2 - 5 0,2 - 2,0	
	НТП	
	1300	
	менее 3,5	0,5- 1,5
	аргон	аргон
	автоматический	
	повторно-кратковременный	
	220 или 380	220
	8,5	
	20	9,7
	600x800x1700 60x60x200 (с видеокамерой)	600x800x2000 60x60x150
		260
		0,8

Документация (технологические процессы, технические условия и т.п.):

Комплект КД (922.53.132.00.00.000)  
Паспорт (922.53.132.00.00.000 ПС)  
Руководство по эксплуатации (922.53.132.00.00.000 РЭ)

## Научные публикации:

Кулик В.И., Коротков А.Н., Степанов В.В., Любченко В.А., Цветков С.Е. Технология и оборудование для высокотемпературной пайки стальных трубопроводов. НТБ Вестник «НПО «Техномаш». Вып. 2, с. 28-30.

Рынок конкурентоспособности продукции: рынок России

Предприятия, на которых планируется внедрение технологии (оборудования):

Название предприятия	Год начала использования оборудования	Изделия, для изготовления которых используется оборудование
ФГУП «НПО «Техномаш»	2017	(опытная эксплуатация оборудования; отработка режимов пайки)
АО «ИСС им. М.Ф.Решетнева»	2018	(универсальное оборудование)
ОАО «КиААПО» (Комсомольск-на-Амуре)	2018–2019	

## ◆ КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 629.73:658.562

*Щенетков Н.А., Макаров И.И., Кочкин Е.В.*

### Современные технические средства контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов

Средства контроля характеристик геометрии масс применяются в технологическом процессе сборки летательных аппаратов на этапе контроля и балансировки.

Первое поколение стенов представляет ССБМ-15М – стенд статической балансировки, предназначенный для определения массы и трёх координат изделия. Принцип действия стенов основан на уравнивании изделия относительно центральной опоры стенов путём установки балансировочных грузов на специальные площадки при его горизонтальном и наклонном положениях.

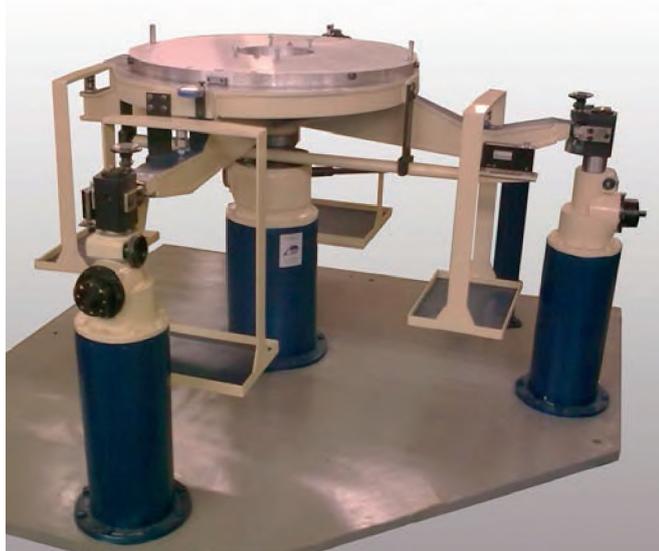


Рис. 1. Стенд ССБМ-15М

На смену стенов ССБМ пришли автоматизированные стенов ЦМ-300, АСКМ-1000 и МЦМ-1000 с подшипниковыми опорами для измерения массы и координат центра масс космических аппаратов. Данные средства измерения обеспечивают погрешность определения массы 0,1% для ЦМ-300, АМИК-1000 и 0,05% для МЦМ-6000. Погрешность определения координаты центра масс составляет 0,1 мм на 1000 мм.

Стенд АСКИ-1000 предназначен для измерения осевых моментов инерции. Автоматизация позволила значительно упростить работу операторов, сократить продолжительность контрольных циклов, уменьшить вероятность ошибок измерений, связанных с субъективными факторами. Данное средство измерения даёт возможность определять момент инерции изделий весом до 1000 кг с точностью 0,1%.

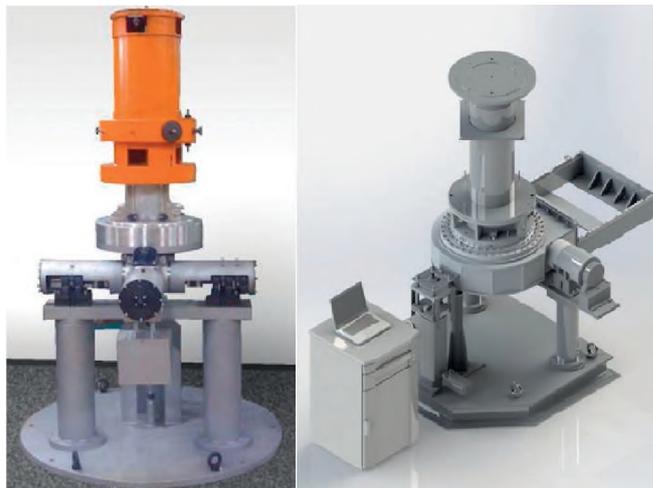


Рис. 2. Автоматизированные стенов ЦМ-300 и МЦМ-1000



Рис. 3. Стенд АСКИ-1000

АМИК-3000 является следующим этапом в развитии средств измерения характеристик геометрии масс и позволяет в автоматизированном режиме определять массу, координаты центра масс, моменты инерции, тензор инерции



и параметры эллипсоида инерции, а также производить статическую и динамическую балансировку летательных аппаратов массой до 3000 кг. Точность определения массы составила 0,1%, координат центра масс – 0,1 мм на 1000 мм, момента инерции – 0,1%.



Рис. 4. Стенд АМИК-3000

В рамках ОКР «Центровка» изготовлен автоматизированный стенд для измерения массы, координат центра масс и геометрических параметров жидкостных ракетных двигателей массой до 6000 кг. Погрешность определения массы составила 0,05%, координаты центра масс – 0,1 мм на 1000 мм.

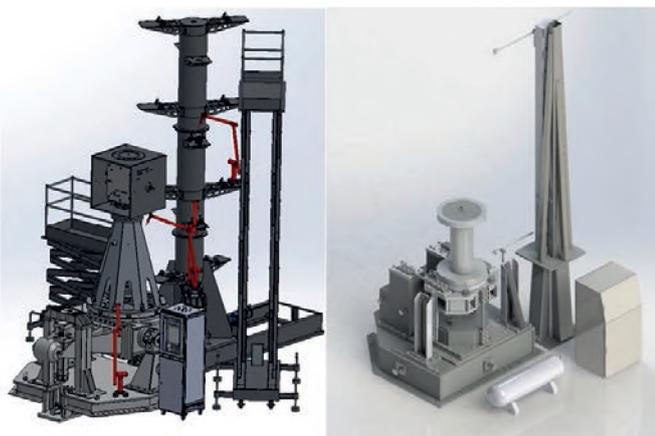


Рис. 5. ОКР «Центровка» и «Дисбаланс»

В рамках ОКР «Дисбаланс» осуществлено производство единственного в Российской Федерации балансировочного станка на аэростатическом подвесе с уникальными характеристиками, который позволяет снизить дисбаланс изделий до 1000 кг на 90% за цикл измерений. Погрешность определения главных центральных осей инерции составляет 1°.

Эталонный измерительный комплекс контроля статических моментов (ЭИКСМ) предназначен для проверки средств измерений координат центра масс изделия. По сравнению с существующими образцами аналогичного оборудования ЭИКСМ обеспечивает расширенный диапазон измерений, повышенную точность и достоверность результатов измерений.

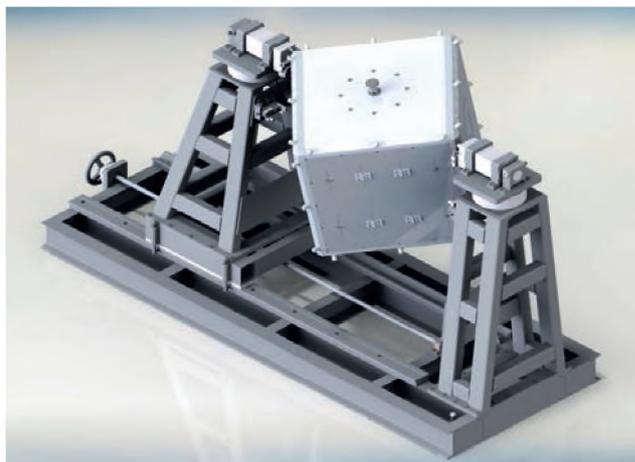


Рис. 6. Эталонный измерительный комплекс контроля статических моментов

### Список литературы

1. Виденкин Н.А. Оптимизация технологических схем позиционирования при определении тензора инерции космического аппарата / Н.А. Виденкин, Е.В. Матвеев, Е.В. Кочкин // Технология машиностроения, 2015. № 12. С.48–53.
2. Матвеев Е.В. Новые автоматизированные стенды для контроля инерционных характеристик космических аппаратов / Е.В. Матвеев, Н.А. Виденкин, Е.В. Кочкин // Наука и технология: материалы XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Миасс: МСНТ, 2012. С. 205.
3. Матвеев Е.В. Становление и развитие на ФГУП «НПО «Техномаш» технологического направления контроля инерционных характеристик космических аппаратов / Е.В. Матвеев, Е.В. Кочкин // Новым изделиям РКТ – новые технологии производства: сб. матер. НПК. Королёв: Машприбор, 2011. С. 47-51.

УДК 629.7:621.9.047.06

Семенов В.В., Егоров А.В., Мазуркевич А.Н., Астахов Ю.П., Белов И.И., Богданов К.А., Митрюшин Е.А., Перепечкин А.А., Фомичев А.О., Щегольсков В.П.

### Новая конструкция станка СЭХО-172М электрохимической обработки деталей ракетно-космической техники

В данной работе рассматривается модернизация оборудования для удаления заусенцев и скругления острых кромок в местах пересечения отверстий в различных деталях типа корпусов пневмогидравлических агрегатов, трубопроводной арматуры, фильтров, форсунок, распылителей и других изделий ракетно-космической техники.

**Ключевые слова:** электрохимический станок, электролит, детали ракетно-космической техники, снятие заусенцев, электрохимическая обработка.

Центром технологического развития ФГУП «НПО «Техномаш», отделением передовых производственных технологий разработана и передана в производство новая конструкция электрохимического станка СЭХО-172М для снятия заусенцев на внутренних поверхностях деталей автоматики изделий ракетно-космической техники (РКТ).

За основу разработки взят прототип – станок СЭХО-172 образца 1989 года. В процессе выполнения переработаны полный комплект конструкторской документации на станок СЭХО-172, схема электрическая принципиальная (рис. 1), а также произведена замена комплектующих (насос подачи электролита, источник технологического тока, стабилизированный источник питания, трансформатор, контакторы, реле, модули индикации, автоматические выключатели, таймер, кнопки управления, сигнализаторы и т.п.).

Вместо пневмогидравлического привода зажима детали использован актуатор (рис. 2) с электромеханическим зажимом.

Гидравлическая схема работы станка в основном осталась прежней (рис. 3).

Станок СЭХО-172М поставлен в цех ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева для электрохимической обработки деталей космических аппаратов (КА), транспортных и пилотируемых кораблей.

На рис.3 изображена схема циркуляции электролита и воды в трубопроводах станка СЭХО-172М.

Электролит из бака 1 при открытом вентиле 4 посредством насоса 5 по трубопроводам 11, 12, 13, 14 подается в камеру 2. При выходе из насоса электролит проходит через фильтр 6. Из камеры электролит самотеком по трубопроводу 16 вновь попадает в бак.

При повышении давления электролита в системе по трубопроводам 15, 17 часть электролита стравливается в бак 1, тем самым понижая давление.

По трубопроводу 21 циркулирует вода, предназначенная для охлаждения электролита. Приток циркулирующей воды обеспечивает заводская магистраль, а слив осуществляется в канализацию.

Для слива отработанного электролита из бака 1 предусмотрен вентиль 10, при открытии которого отработанный электролит сливается в канализацию.

Для промывки обработанных деталей в станке предусмотрена ванна 3. Вода подается из заводской магистрали по трубопроводу 22 в ванну 3. Закрытием вентиля 7, достигается необходимый уровень воды, при котором жидкость начинает течь через перелив 20, попадая в сливную магистраль. При открытии вентиля 7 осуществляется промывка деталей, при этом вода напрямую течет в канализацию через трубопровод 19.

После промывки детали сушатся в ванне 9, которая находится рядом с ванной 3. Открытие вентиля 8 позволяет скопившейся влаге уходить по трубопроводу 18 в канализацию.

В процессе создания станка СЭХО-172М принимали участие многие специалисты ФГУП «НПО «Техномаш»:

– А.В. Селиверстов, В.П. Щегольсков, Е.А. Митрюшин, А.Н. Королев, К.А. Богданов, А.О. Фомичев, Ю.П. Астахов, А.А. Перепечкин, В.П. Самоходкин, А.Н. Мазуркевич, А.В. Егоров, И.И. Белов – от технологических отделений;

– С.Г. Канунников, А.А. Дергачев, В.Г. Дегтярев, В.Н. Небров – от производственного комплекса;

– П.Е. Шашин, К.В. Чернышев, С.В. Картошкин, О.В. Кузьминов, В.П. Чесноков, М.И. Данилин, В.А. Ильин – от отделов главного механика и энергетика;

– В.Х. Бичурин, А.Д. Соколов – от транспортного отдела.

Положено начало одному из основных направлений работы предприятия – модернизации оборудования работок 70–80-х годов XX века на новую элементную базу, с новыми задачами для выполнения требований Главного конструктора по точности, чистоте обработки, экономическим показателям.

По мнению авторов статьи, станки СЭХО-172М будут востребованы на многих предприятиях РКТ, авиационной, атомной техники и промышленных предприятиях теплоэнергетики.

Под этот объемный кластер работок необходимы конкретные НИОКР для решения типовых конструкторских и технологических задач создания современного оборудования.



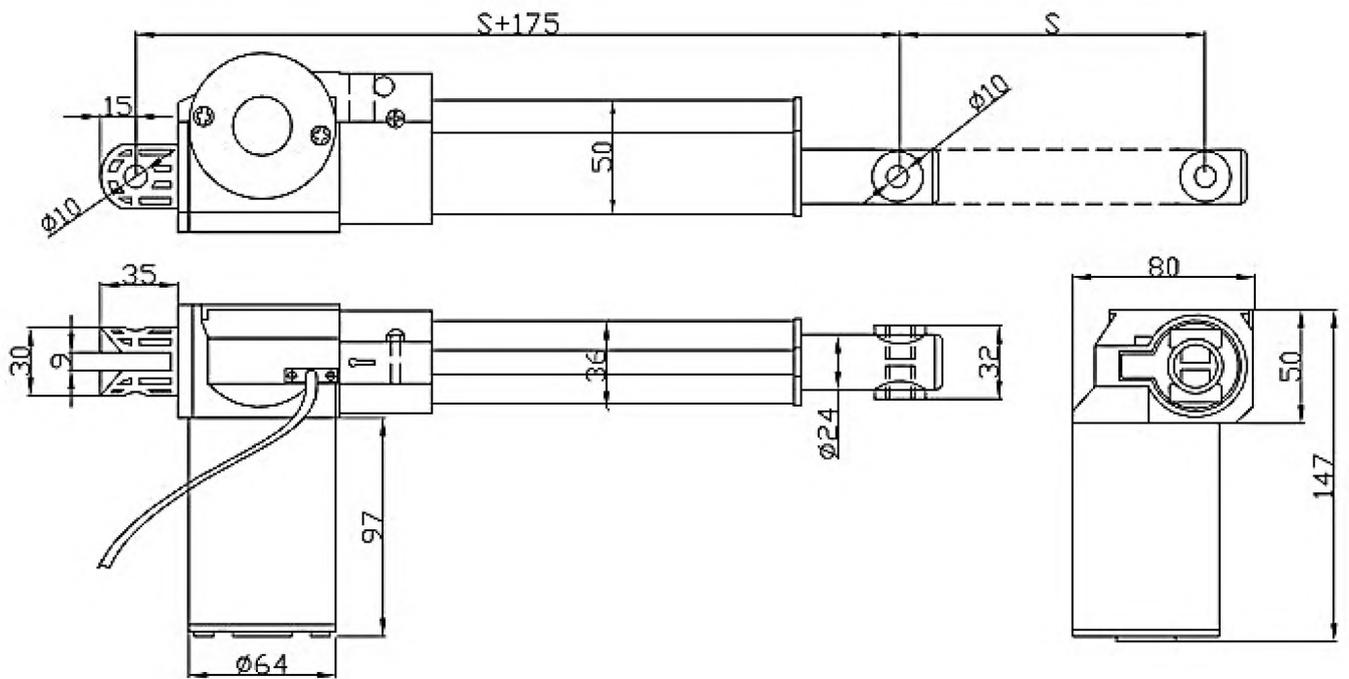


Рис. 2. Актуатор

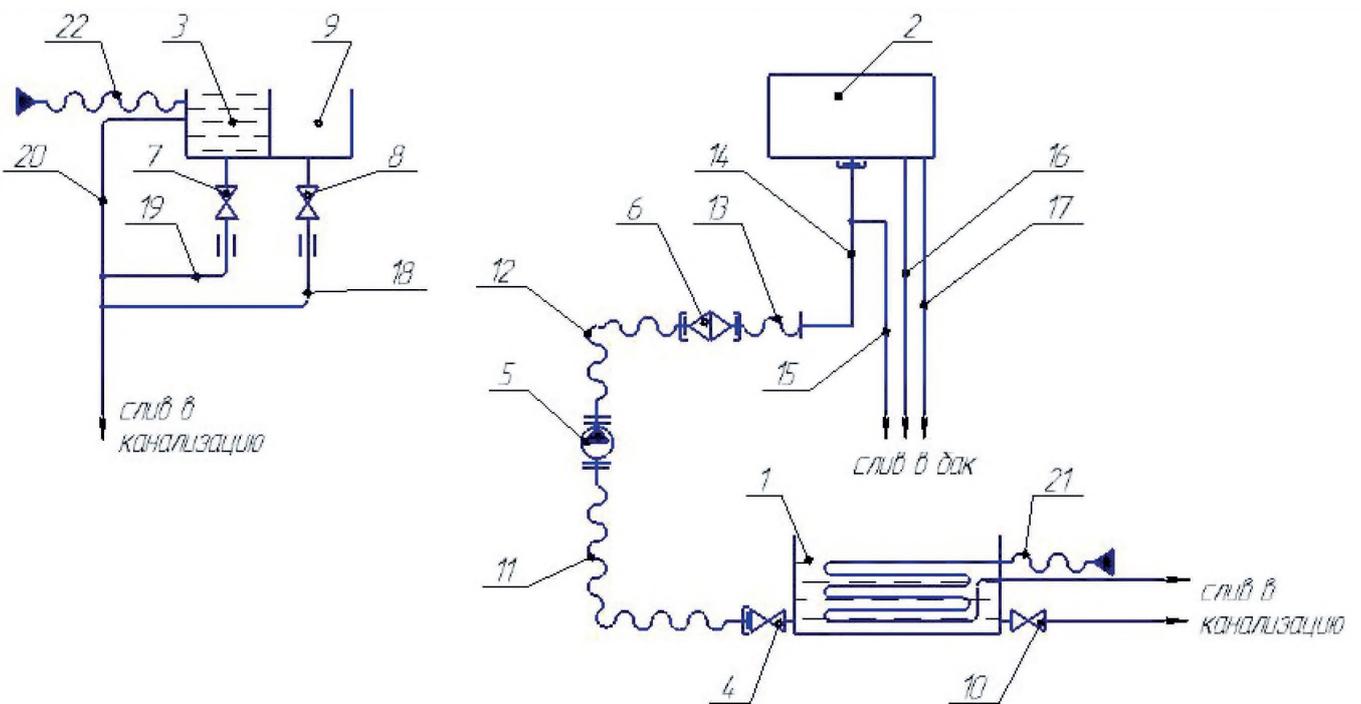


Рис. 3. Схема циркуляции электролита и воды

УДК 629.78

Писаренко А.А., Ковалев А.М.

## Механообрабатывающий центр модели «СВО-3500» для формирования вафельного фона на крупногабаритных корпусных конструкциях изделий ракетно-космической техники

В статье рассмотрены способы формирования вафельного фона на поверхности крупногабаритных деталей при производстве корпусных деталей ракетно-космической техники. Представлено разработанное ФГУП «НПО «Техномаш» оборудование для формирования вафельного фона посредством механической обработки. Приведены его основные технические характеристики, обозначены основные отличия оборудования от современных аналогов и ранее внедрённого и используемого на предприятиях ракетно-космической промышленности.

**Ключевые слова:** вафельный фон, фрезерование, адаптивный контроль, крупногабаритные корпусные детали малой жёсткости.

При проектировании новых изделий ракетно-космической техники (РКТ) одним из важнейших аспектов является проблема обеспечения несущей способности корпусных конструкций ракет при минимальной их материалоемкости, т.е. обеспечение прочности и жёсткости конструкций при минимальной их массе.

Одним из эффективных путей решения данной проблемы является формирование на наружной или внутренней поверхностях конструкций цилиндрической, конической и сфероидальной форм «вафельного фона» (ВФ) (рис 1.).

Формирование вафельного фона на поверхностях деталей сводится к удалению части материала исходной заготовки с формированием на поверхности заготовки сетки ячеек заданной формы и геометрических размеров.

Существуют несколько технологических способов формирования ВФ:

- механическая обработка (формирование ВФ на плоских листовых заготовках (плитах) с последующим сворачиванием и сваркой; формирование ВФ на предварительно сваренных конструкциях);
- электрофизические методы;
- штамповка соответствующего узора на листовых заготовках с последующим их сворачиванием и сваркой.

На предприятиях Госкорпорации «Роскосмос» при изготовлении разных изделий используются все пере-

численные методы. В то же время в производстве крупногабаритных конструкций предпочтительным является формирование ВФ на предварительно свернутых и сваренных листовых заготовках. Несмотря на то, что при этом способе более 80% процентов исходного материала заготовки снимается в стружку и для его реализации требуется сложное специальное механообрабатывающее оборудование, данный метод позволяет в полной мере выдерживать геометрические и точностные требования к готовому изделию.

Следует отметить, что одной из устойчивых тенденций развития РКТ является увеличение габаритных размеров изделий, в частности, диаметров основных габаритообразующих баковых элементов конструкций. При этом возрастают требования по точности толщины остаточного полотна и геометрии элементов обрешетки.

Таким образом, оборудование, формирующее ВФ на корпусных конструкциях изделий, требует постоянно совершенствования.

Для формирования ВФ на корпусных конструкциях изделий РКТ ФГУП «НПО «Техномаш» разработана и внедрена на предприятиях отрасли гамма копировально-фрезерных станков моделей «СВО» (1981–2009 гг.) и копировально-фрезерный станок СВДО-14 (2011 г.).

Станок СВО-22 изготовлен в 1981 г., СВО-30 – в 1987-м (рис. 2 и 3).



а)



б)

Рис. 1. Детали с сформированным ВФ:

а) цилиндрическая обечайка с внутренним ВФ; б) полусфера с наружным ВФ



Рис. 2. Общий вид станка СВО-22



Рис. 3. Общий вид станка СВО-30

Основные паспортные характеристики станка СВО-30 приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики	Значение
размеры обрабатываемых заготовок, мм, не более	
диаметр	3000
высота	2000
толщина заготовки	30
характеристики	
количество фрезерных головок	3
частота вращения шпинделя, мин	3000
мощность шпинделя, кВт	11
габариты станка, ДхШхВ	13500x10000x7000
питание, В x Гц	50 x 380
потребляемая мощность, кВт	150
Масса станка, т	200

Станок СВДО-14 изготовлен в 2011 г.



а)



б)

Рис. 4. Общий вид опытного образца станка СВДО 14

Основные паспортные характеристики станка СВДО-14 приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Характеристики	Значение
размеры обрабатываемых заготовок, мм, не более	
цилиндрических:	
диаметр	4200
высота	2200
Конических:	
Диаметр	2000-4200
угол раскрытия конуса, град	40-90
Сферических:	
диаметр, мм	2000-4200
радиус сферы, мм не менее	600
количество фрезерных головок	1
частота вращения шпинделя, мин	до 25000
мощность шпинделя, кВт	29
габариты станка, ДхШхВ	13000x9000x6900
питание, В x Гц	50 x 380
потребляемая мощность, кВт	150
Масса станка, т	300

В порядке модернизации производственной базы предприятий, занимающихся изготовлением корпусных деталей РКТ, специалистами ФГУП «НПО «Техномаш» спроектировано технологическое оборудование, позволяющее формировать ВФ на изделиях диаметром

до 3500 мм и оснащённое принципиально новой адаптивной системой контроля процессов формирования внутреннего и наружного ВФ.

Оборудование выполнено в порталной компоновке; основные узлы показаны на рис 5.

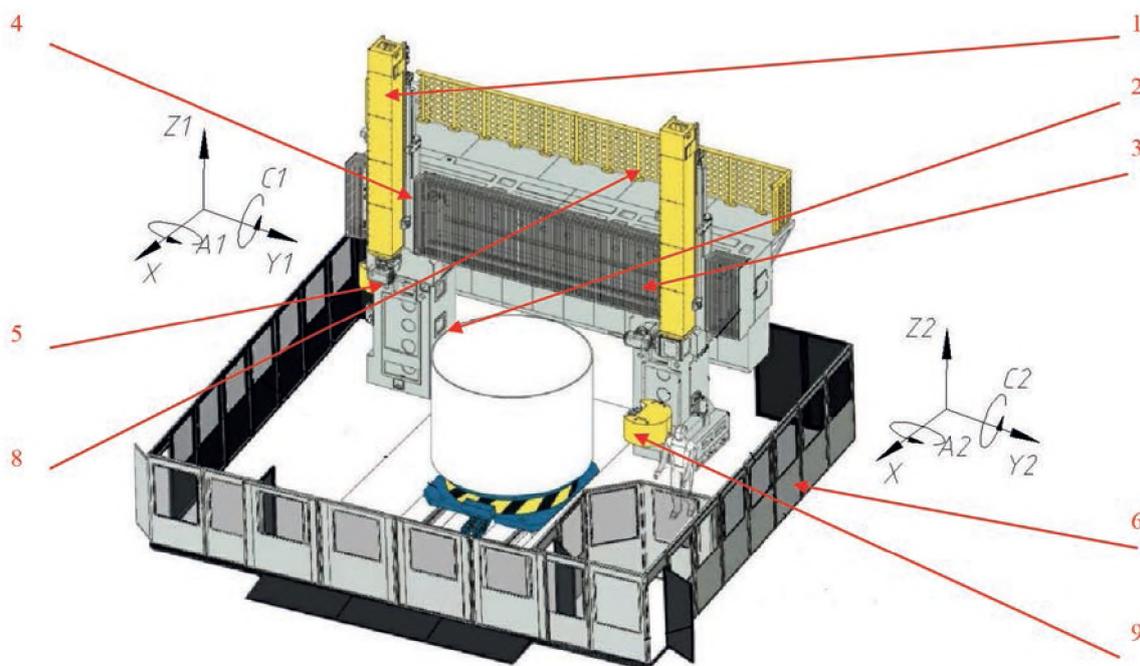


Рис. 5. 3D-компоновка комплекса СВО-3500:

- 1 – суппорт (правый/ левый); 2 – стойка-(правая/ левая); 3 – гофрозащита; 4 – каретки (правая/ левая);  
 5 – головки фрезерные (правая/ левая); 6 – кабинет; 7 – поворотный стол;  
 8 – площадка обслуживания; 9 – магазин инструментов (правый/ левый)

Кинематика станка позволяет формировать наружный и внутренний ВФ на поверхности цилиндрических, конических деталей, а также, при необходимости, в случае применения специального приспособления на станке реализована возможность обработки полусфер, что позволяет изготавливать всю номенклатуру изделий в заданных габаритах на одном станке.

Комплекс СВО оснащён:

- цифровой системой ЧПУ типа SINUMERIK 840Di;
- системой автоматической адаптации параметров обработки к реальному контуру и фактической толщине обрабатываемой детали;
- системой корректировки программ управления по фактическому текущему износу режущего инструмента;
- системой сбора стружки и отвода СОЖ с их последующим разделением, очисткой и рекуперацией СОЖ.

Комплекс СВО комплектуется двумя револьверными магазинами инструментов, каждый на 20 позиций.

В состав комплекса входят:

- система ультразвукового контроля, обеспечивающая контроль остаточного полотна заготовки при обработке на заданную глубину. Дополнительно может быть использована для обеспечения контрольных операций по обмеру ячеек на предмет выдержки допуска по остаточному полотну после обработки;
- измерительная система фирмы RENISHAW, позволяющая проводить часть технологических операций по выставке заготовки в приспособлении, а также производить контрольные операции по обмеру ячеек для кон-

троля допуска на толщину ребер ячеек готового изделия после обработки без снятия изделия с приспособления.

Дополнительно: на станке возможно производить сверление отверстий, нарезание резьбы, фрезерование пазов, выполнять подрезку торца.

Перечисленные возможности, заложенные в спроектированное оборудование, на этапе его внедрения позволят существенно сократить длительные технологические операции по выставке заготовки; общее время, затрачиваемое на получение готового изделия за счёт вычленения из технологической цепочки обработки изделия времени, затрачиваемого на переустановку детали, транспортировку; избежать ручных операций по сверлению отверстий и нарезанию резьбы, исключить использование КИМ.

Концепция станка сводится к тому, чтобы избавиться от большей части вспомогательных операций и оборудования и, начиная с момента сварки готовой заготовки, все операции выполнять на одном станке.

Стоит отметить, что за счёт применения новых конструкционных материалов в конструкции подпятника подпора противощпинделя, препятствующего продавливанию стенки детали фрезой режущей фрезерной головки во время обработки, удалось избавиться от проблемы появления царапин на поверхности внутренней стенки заготовки при формировании кармана. Данная проблема наблюдается на косвенных станках-аналогах, что позволяет впоследствии избежать длительной, кропотливой доводочной операции шабрения.

Основные технические характеристики станка СВО-3500 приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Характеристики	Значение
класс точности оборудования по ГОСТ 8-82	Н
режим работы оборудования	в соответствии с программой ЧПУ
максимальные габариты обрабатываемых деталей, мм:	
цилиндр:	
– диаметр	3000-3500
– высота, не более	2000
конус:	
– диаметр основания, не более	1500
– угол раскрытия, град, не более	150
максимальная толщина обрабатываемого материала, мм	40
диаметр планшайбы стола, мм	3500
количество фрезерных головок, шт.	2
точность обработки детали, мм:	
– по остаточному полотну	± 0,1
– по толщине ребер	± 0,1
количество управляемых осей, шт.	12
количество одновременно управляемых осей, шт.	9
мощность привода главного движения, кВт	до 40
частота вращения шпинделя главного движения, мин <sup>-1</sup>	до 20000



Характеристики	Значение
конус шпинделя	HSK63A
режим измерительной машины	есть
габаритные размеры ДхШхВ, мм	7700х5500х6400
масса, кг	65000
площадь размещения комплекта оборудования, м <sup>2</sup>	42

Следует отметить, что прямых зарубежных и отечественных аналогов комплекса СВО-3500 нет.

Косвенными аналогами можно считать станки фирмы DEUFIEUX Франция, а также отечественные станки модели «СВФ-3500», разработанные АО «Станокотех» (г. Коломна, 2017 г.).

Коломенские станки имеют практически аналогичную компоновку и много других схожих технических решений, но используют все тот же традиционный принцип копирования, тогда как инновационной особенностью станка СВО-3500 является использование при обработке

принципа «адаптивного контроля», когда измерительные системы станка позволяют контролировать глубину резания фрезы в массив заготовки на основании обратной связи от контролирующих систем непосредственно во время фрезерования и на основании полученных данных выдерживать в пределах заданного допуска глубину остаточного слоя, что особенно важно при обработке конических и сферических корпусных деталей, когда с увеличением количества задействованных координат растёт результирующая погрешность, сказывающаяся в конечном итоге на параметрах готового изделия.

✦ ДЛ Я ЗАМЕТОК



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

✦ ДЛ Я ЗАМЕТОК



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018

✦ ДЛ Я ЗАМЕТОК



НПО ТЕХНОМАШ  
1938 — 2018



**ПОДНИМИ  
ГОЛОВУ!!**

ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ»  
г. Москва  
3-й проезд Марьиной Рощи, д.40  
[www.tnpo.ru](http://www.tnpo.ru)