

ИСТОРИЯ. СОБЫТИЯ. ЛЮДИ

HISTORY. EVENTS. PEOPLE

УДК 629.78.072.8

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТРЕНАЖЕРА РУЧНОГО УПРАВЛЯЕМОГО СПУСКА ТПК «СОЮЗ» НА БАЗЕ ЦЕНТРИФУГИ ЦФ-18

А.П. Суворов, Л.А. Фролов, В.Н. Киршанов, И.Н. Гаврик,
И.В. Щепанский, В.М. Краев, Д.В. Вовк

А.П. Суворов; Л.А. Фролов (АО «НИИАО»)
В.Н. Киршанов; И.Н. Гаврик; И.В. Щепанский; В.М. Краев; Д.В. Вовк
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлены материалы по анализу опыта разработки, создания и эксплуатации специализированных динамических тренажеров ручного управляемого спуска ТПК «Союз» на базе центрифуг ЦФ-7 и ЦФ-18. В краткой форме изложена история создания первого динамического тренажера «Пилот-732» на платформе ЦФ-7. Изложены основные моменты проектирования и изготовления специализированного динамического тренажера ручного управляемого спуска на базе центрифуги ЦФ-18, перспективы использования в процессе подготовки космонавтов к пилотируемым полетам в космос, проблемные вопросы и пути их решения.

Ключевые слова: Центр подготовки космонавтов, центрифуга, тренажер, транспортный пилотируемый корабль, факторы космического полета, перегрузка, ручной управляемый спуск

Experience of Developing and Operating a Centrifuge Cf-18-Based Dynamic Simulator for Practicing Manually Controlled Descent of the “Soyuz” Spacecraft. A.P. Suvorov, L.A. Frolov, V.N. Kirshanov, I.N. Gavrik, I.V. Shchepansky, V.M. Kraev, D.V. Vovk

The paper analyzes the experience of development and operation of dedicated dynamic simulator for Soyuz manually controlled descent training, designed on the basis of the TsF-7 and TsF-18 centrifuges. The history of creation of the first dynamic simulator “Pilot-732” based on the TsF-7 is briefly described. The main aspects of design and manufacture of the simulator, the prospects for using it to train cosmonauts for manned space flights, problematic issues and ways to solve them are outlined.

Keywords: Cosmonaut Training Center, centrifuge, simulator, manned transport vehicle, space flight factors, G-load, manually controlled descent

В конце 70-х годов XX века специалисты Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (ЦПК, Центр) пришли к выводу о том, что подготовка космонавтов по ручному управлению спускаемым аппаратом (СА) на статических обучающих устройствах недостаточна. В связи с этим было предложено ввести в программу подготовки космонавтов по управлению спуском СА подготовку на динамическом тренажере на платформе центрифуги ЦФ-7 (ЦФ-7). В случае использования режима ручного управляемого спуска (РУС) на ЦФ-7 моделировались перегрузки, действующие на космонавта в реальном полете при возвращении на Землю СА. В то время в ЦПК находилась в эксплуатации и использовалась для подготовки космонавтов только ЦФ-7, а строительство центрифуги ЦФ-18 (ЦФ-18) находилось в стадии пусконаладочных работ.

Идея создания динамического тренажера РУС на базе ЦФ-7 была предложена руководству Центра начальником 24-го отдела (отдел центрифуг) А.В. Любимовым. В результате совместных усилий специалистов Центра в 1982 году приемочной комиссии был представлен на испытания тренажер РУС «Пилот-732» с рабочим местом космонавта в кабине ЦФ-7 (рис. 1).

После испытаний в сентябре 1982 года «Пилот-732» был допущен для подготовки космонавтов к режимам РУС в условиях воздействия перегрузок.

В процессе жизненного цикла «Пилот-732» периодически модернизировался до версии «Пилот-732М».

В апреле 2002 г. на смену морально и физически устаревшему тренажеру РУС «Пилот-732М» пришел специализированный динамический тренажер РУС ТС-18 (тренажер ТС-18) [1] на базе ЦФ-18. Общий вид динамического рабочего места космонавта тренажера ТС-18, размещенного в кабине «А» ЦФ-18, приведен на рис. 2. Однако в целях обеспечения непрерывности



Рис. 1. Тренажер «Пилот-732» в кабине ЦФ-7



Рис. 2. Тренажер РУС ТС-18 в кабине ЦФ-18

подготовки космонавтов на период ввода в эксплуатацию тренажера ТС-18, тренажер «Пилот-732М» в течение еще полутора лет находился в составе технических средств подготовки космонавтов (ТСПК) ЦПК. И только 13 октября 2003 г. после того как стало ясно, что тренажер ТС-18 успешно прошел обкатку и полностью решает задачи подготовки космонавтов по режимам РУС, руководством ЦПК было принято решение об исключении тренажера «Пилот-732М» из списка ТСПК Центра.

Специализированный динамический тренажер ТС-18 РУС транспортного пилотируемого корабля (ТПК) «Союз» на базе ЦФ-18 стал очередным шагом на пути создания динамических тренажеров в ЦПК.

Создание тренажера ТС-18 началось в начале 90-х годов в НИИ авиационного оборудования (АО «НИИАО»). Это событие совпало с процессом разработки в АО «НИИАО» пульта космонавтов (ПК) нового поколения «Нептун-МЭ» для ТПК «Союз» на новом технологическом уровне – вместо электронных и электромеханических приборов были применены программно-аппаратные вычислительные средства и жидкокристаллические дисплеи. Электронно-механические приборы встраивались в диалого-дисплейную систему интегрированного пульта управления (ИнПУ) космическим кораблем. Новаторское изменение устройства ПК вызывало необходимость проведения испытания интерфейса «космонавт – пульт космонавта» при управлении СА в условиях воздействия на оборудование и космонавта реального физического фактора космического полета – перегрузки. Специализированный динамический тренажер РУС на базе ЦФ-18 весьма подходил для этой цели.

В роли Заказчика разработки и изготовления тренажера ТС-18 выступил ЦПК. Работу по его разработке и изготовлению выполняли совместно:

- АО «НИИАО» – головной исполнитель;
- ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»;
- МГУ имени М.В. Ломоносова.

Специализированный динамический тренажер ТС-18 на базе ЦФ-18 предназначен для решения следующих задач подготовки [2, 3]:

1. Формирование у космонавтов знаний по РУС СА ТПК «Союз» при возможном воздействии фактора перегрузки на атмосферном участке спуска (динамический режим с вращением центрифуги).

2. Отработка навыков космонавтов по действиям в нештатных ситуациях (НшС) на этапе спуска.

3. Формирование и поддержание профессиональных навыков космонавтов по ручному управлению СА ТПК «Союз» (при воздействии перегрузки на атмосферном участке спуска).

4. Оценка операторской деятельности космонавтов при выполнении режима РУС.

5. Проведение исследований с целью корректировки существующих методик выполнения космонавтами РУС.

При разработке тренажера ТС-18 были успешно решены следующие проблемные вопросы [2, 4]:

1. Формирование блока исходных данных для моделирования режимов РУС.

2. Конструирование рабочих мест космонавтов в кабине «А» ЦФ-18.

3. Обмен информацией через вращающиеся контактные устройства центрифуги между ПК, расположенным в кабине «А» ЦФ-18, и вычислительной системой тренажера ТС-18, расположенной в пульте контроля и управления тренировкой (ПКУТ), установленного рядом с пультом главного оператора центрифуги.

4. Сертификация тренажера ТС-18 для допуска к подготовке космонавтов.

Началом работы над любым сложным объектом, в том числе математическим моделированием полета ТПК и работы его систем, является наличие исходных данных. В нашем случае это была первая проблема – проблема исходных данных, так называемого Data Package. По существу, это весь набор данных, которые описывают ТПК, все то, что заложено в его бортовых системах для реализации режима спуска.

В результате взаимного согласования данного вопроса с разработчиками штатного алгоритма системы управления спуском (СУС) ТПК «Союз», разработчики пришли к следующему решению данной проблемы: АО «НИИАО», головной исполнитель, получал от ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» исходные данные модели движения СА и СУС в виде программных модулей, написанных на языке программирования (C/C++). Этот подход

к построению модели СУС сократил время разработки тренажера и в дальнейшем позволил решить другой не менее важный вопрос – сертификацию тренажера.

В состав динамического тренажера ТС-18 на базе ЦФ-18 входят [2, 3, 4]:

- ПК «Нептун-МЭ» (ПК «ПСА-2Э-ТДК-МС», после модернизации тренажера), расположенный в кабине «А» ЦФ-18;
- устройство сопряжения с объектом (УСО);
- вычислительная система тренажера, расположенная в ПКУТ, установленном рядом с пультом главного оператора центрифуги;
- программно-математическое обеспечение (ПМО) тренажера, включающее модель движения и модели бортовых СУС ТПК;
- ручка управления спуском;
- ПКУТ;
- кресло космонавта «Казбек-УМ-М»;
- устройства крепления ПК и кресла космонавтов в кабине ЦФ-18.

Нужно отметить, что ранее на тренажере ТС-18 использовался созданный на базе цифровых технологий ПК «Нептун-МЭ», который устанавливался и на ТПК «Союз». На текущий момент времени на тренажере используется ПК «ПСА-2Э-ТДК-МС» с функциями, обеспечивающими работу тренажера по моделированию ручного управления СА на этапе спуска с момента вхождения в плотные слои атмосферы Земли.

В динамическом режиме работы тренажера (с вращением центрифуги) задействованы также пульт управления центрифугой (рабочее место главного оператора ЦФ-18), с которого главный оператор центрифуги выдает команды на запуск и остановку центрифуги в соответствии с циклограммой тренировки, а также пульт врача (рабочее место врача и вспомогательного медицинского персонала), с которого осуществляется непрерывный контроль за функциональным состоянием космонавта, находящегося в кабине центрифуги. Руководит динамической тренировкой космонавта на тренажере ТС-18 инструктор, который осуществляет взаимодействие с космонавтом посредством дуплексной связи.

Тренажер включает в себя два рабочих места оператора: динамическое рабочее место оператора (РМО-Д), расположенное в кабине «А» центрифуги (рис. 2), и статическое рабочее место оператора (РМО-С), расположенное вне кабины «А» центрифуги – рядом с ПКУТ в пультовом зале (рис. 3). Статические тренировки также можно проводить с использованием РМО-Д. В этом случае инструктор остается в пультовом зале ЦФ-18 на своем рабочем месте за ПКУТ, а космонавт находится на РМО-Д в кабине «А» ЦФ-18. При этом вращение центрифуги не производится.

Специализированный динамический тренажер РУС обеспечивает имитацию процесса управляемого спуска СА ТПК «Союз» как в автоматических, так и в ручных режимах управления с реальным воздействием перегрузки на космонавта.



Рис. 3. РМО-С

При создании тренажера разработчиками были успешно решены проблемы построения РМО-Д, расположенного в кабине «А» ЦФ-18, основу которого составляют: ПК «Нептун-МЭ» (на начальном этапе эксплуатации) и ПК «ПСА-2Э-ТДК-МС» (на текущий момент времени), УСО, кресло космонавта «Казбек-УМ-М», ручка управления спуском, шлемофон, указка, устройства крепления ПК и кресел космонавтов «Казбек-УМ-М».

Необходимо отметить сложность в работе над устройствами крепления пульта космонавтов и кресел космонавтов «Казбек-УМ-М» в кабине центрифуги. Во-первых, кабина «А» центрифуги имеет конструкцию отличную от кабины штатного СА и, во-вторых, жесткое условие обеспечения возможности экстренной эвакуации космонавта из кабины (условие безопасности космонавтов) предопределили неординарные решения этой проблемы. Необходимо было также учитывать требование перемещения ПК из кабины «А» центрифуги после динамических режимов работы тренажера и его установки в ПКУТ для работы в статическом режиме [2, 4].

Принципиальной особенностью ЦФ-18 является расположение ее кабины в управляемом трехступенном кардановом подвесе, что позволяет с помощью программного управления центрифугой воспроизводить любые меняющиеся по величине и направлению профили перегрузок, действующие на космонавта.

На тренажере ТС-18 используются алгоритмы имитации вектора перегрузки, позволяющие точно вычислить программные сигналы, поступающие в систему управления центрифугой, синхронизирующие повороты кабины, кольца и вилки с текущим значением угловой скорости плеча ЦФ-18.

Что касается вопроса передачи управляющей информации в кабину «А» центрифуги на ПК через вращающиеся контактные устройства (ВКУ), то в начале работы были проведены исследования по возможности передачи выработанной в вычислительной системе тренажера информации в кабину «А» центрифуги. Исследования дали положительные результаты – передача цифровой информации через ВКУ проходила без потерь с достаточной для работы тренажера скоростью.

В дальнейшем на тренажере была проведена работа по беспроводной передаче информации от вычислительной системы тренажера (неподвижная точка) в кабину центрифуги (вращающаяся точка). В процессе проведенных экспериментов было установлено, что, применяя традиционные средства построения беспроводных сетей, получить бесперебойный обмен данными в условиях закрытой экранированной кабины при вращении ЦФ не удается.

На начальном этапе разработки и эксплуатации динамического тренажера на базе ЦФ-18 (2002–2012) можно было моделировать спуски ТПК «Союз» в автоматическом и ручном режимах. Режим спуска начинался после отделения СА от МКС, включая баллистический расчет траектории спуска, отработку тормозного двигателя для спуска, контроль уставочной информации на спуск по условию приведения в заданный район посадки. На тренажере было реализовано (что очень важно для тренировок экипажей) девять НшС в режиме спуска, вводимых с пульта управления тренировкой в момент, определяемый инструктором.

Начиная с 2012 года тренажер ТС-18 на базе ЦФ-18 эксплуатируется в режиме РУС, который начинался за 2–3 минуты до команды «Разделение» (отделение СА от БО ТБК) на высоте около $H = 140$ км. Позднее, с 2018 года и по настоящее время, когда стали использовать реальные вектора, динамический режим спуска отрабатывается в ускоренном варианте, от его запуска до входа в атмосферу. С главного формата ПКУТ выбирается состояние, соответствующее режиму РУС, задается вариант начальных условий, задаются возмущения: внеатмосферный промах (от -60 до $+60$ с), центровка по оси Y мм. По команде «Разделение» на ИнПУ выбирается формат «СПУСК» (космонавт О.В. Котов в кабине ЦФ-18 отрабатывает РУС, рис. 4).

На формате «СПУСК» представляется вся необходимая информация для управления спуском и отображается:

- опорная зависимость $t(V_s)$ «полетное время – кажущаяся скорость», сформированная вычислителем спуска;
- индекс (квадрат) фактического движения СА в атмосфере в координатах $t(V_s)$;
- «полетное время – кажущаяся скорость»;
- шкала угла крена и индекс текущего угла крена СА;
- значение интеграла отклонения фактического времени спуска от расчетного, заданного опорной кривой.



Рис. 4. Фрагмент формата ИнПУ «СПУСК»

В правой части формата приводятся данные:

- значение текущей перегрузки на атмосферном участке;
- информация о текущей высоте СА и удалении от расчетной точки посадки;
- прогнозируемое значение внеатмосферного промаха (индикатор промаха мигает в течение 1 мин после «Разделения»);
- внеатмосферный промах по входу в атмосферу.

В режиме РУС управляющий угол крена формируется космонавтом по информации, отображаемой на дисплее ПК, и посредством ручки управления спуском передается в аппаратуру управления угловым движением СА.

Программно-математическое обеспечение (ПМО) тренажера включает: модель движения СА, модель бортовых систем управляемого спуска, диспетчер реального времени, графические форматы контроля и управления тренировкой, протоколы информационного взаимодействия ПМО модели СУС с ПМО ПК.

ПМО тренажера реализовано в вычислительной системе (ВС) тренажера. ВС в структуре тренажера представляет собой открытую систему с ОС Linux и включает рабочие станции, построенные на базе процессоров Intel. В качестве основы построения интерфейсной системы выбран международный стандарт VME с процессором на базе Power PC с операционной системой реального времени OS-9000. В качестве коммуникаций используется Интернет-протокол UDP.

Управление тренажером осуществляется через главный формат управления ИнПУ на ПК [2, 4]. (В кабине ЦФ-18 космонавт А.А. Скворцов, рис. 5). На этом формате отражаются основные (часто используемые) элементы управления и отображения процесса управления и параметров спуска.



Рис. 5. Рабочее место оператора

Остальные элементы управления доступны через главное меню этого формата – верхняя полоса. На главном формате управления тренировкой выводится обобщенная оценка по результатам выполнения режима РУС в соответствии с методикой оценки действий космонавта.

Заключительный этап работы над проектом – этап динамических прочностных испытаний, включающий в себя два подэтапа. На первом подэтапе, на базе современного оборудования и методик были выполнены работы по контролю напряженного состояния нагруженных элементов конструкции с дальнейшим анализом результатов, сравнением их с данными, полученными при выполнении расчетов, и последующим исследованием силовых элементов методами неразрушающего контроля.

На втором подэтапе были проведены динамические прочностные испытания РМО-Д при воздействии перегрузки в разных направлениях. В основном направлении (n_x) перегрузка достигала величины 12 ед., в боковых – 6 ед. Испытания проводились по специальной программе и методике, предписывающей укладку в кресло космонавта манекена, с использованием штатной привязной системы кресла «Казбек-УМ-М». Проведенные инструментальные испытания дали положительные результаты, которые позволили провести успешные испытания тренажера в режиме РУС с оператором в кабине «А» ЦФ-18 с ограничением перегрузки $n_x \leq 6$ ед. Этим оператором был космонавт С.В. Залетин, который занял место в кресле командира корабля. В соответствии с программой и методикой он выполнил полный цикл испытаний тренажера как в статическом режиме, так и в динамическом режиме с вращением центрифуги.

С 2002 года по настоящее время на тренажере прошли подготовку космонавты, начиная с экипажей МКС – ЭП-4 (Ю.В. Лончаков, С.В. Залетин,

Франк Де Винн (Бельгия)) и МКС-6 (Н.М. Бударин, К. Бауэрсокс (США), Д. Петтит (США)) до экипажа МКС-68 (С.В. Прокопьев, Д.А. Петелин, А.Ю. Кикина).

В процессе эксплуатации тренажер находится в состоянии перманентной модернизации. Модернизация тренажера спуска направлена на решение следующих основных задач:

1. Приведение ПМО в соответствие с новыми версиями ПМО ТПК «Союз».
2. Доработка ПК.
3. Интегрирование УСО тренажера в ПК «ПСА-2Э-ТДК-МС».
4. Модернизация статического рабочего места оператора.
5. Модернизация ПКУТ.
6. Совершенствование ПМО графического интерфейса инструктора.
7. Создание ПМО регистрации, обработка и хранение данных.

С 2013 года тренажер ТС-18 наряду с подготовкой космонавтов также широко используется при проведении экспериментальных исследований, проводимых в рамках НИР «Созвездие» и «Созвездие-ЛМ» с участием космонавтов в целях оценки сложной операторской деятельности и возможностей российских космонавтов, членов экипажей МКС по ручному управлению СА до полета (в качестве фоновых данных на заключительном этапе подготовки) и после полета на 1-е сутки после посадки экипажа на Землю. Цель экспериментальных исследований – создание научного задела, подтвержденного эмпирическим путем, по всестороннему анализу и оценке возможности осуществления ручной посадки спускаемого модуля ТПК на поверхность космического тела (астероид, планета) после длительного пребывания (перелета) космонавтов в космосе (невесомости). В исследованиях приняли участие космонавты экипажей МКС-33... МКС-67.

Интенсивность использования тренажера в процессе подготовки космонавтов и при проведении различного рода исследований и испытаний характеризуется его наработкой в статических и динамических условиях работы. С 2002 года, за более чем двадцатилетний период эксплуатации тренажера ТС-18, проведено 2918 тренировок в статических условиях и 364 тренировки в динамических условиях; космонавтами было отработано, соответственно, 20 426 и 728 режимов спуска.

При этом все системы тренажера показали высокую надежность. За весь период подготовки космонавтов на тренажере ТС-18 не зафиксировано ни одного случая срыва тренировок космонавтов по причине его неготовности или отказов в период проведения тренировок. Со стороны космонавтов, инструкторов, медицинских специалистов и психологов, осуществляющих подготовку, медицинский контроль, психофизиологический контроль и оценку состояния космонавтов, неоднократно высказывались мнения о важности тренировок космонавтов на этом тренажере и целесообразности его дальнейшего использования при подготовке экипажей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Киршанов, В.Н. Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина. Центрифуга ЦФ-18 – 40 лет на службе Отечеству (часть 1) / В.Н. Киршанов, А.П. Чудинов, И.Н. Гаврик // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 1(42). – С. 119–131.
- [2] Экспериментальные исследования по оценке выполнения космонавтами сложной операторской деятельности после длительного космического полета на МКС в интересах осуществления полетов в дальний космос / С.К. Крикалёв, Б.И. Крючков, М.М. Харламов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 4(9). – С. 24–35.
- [3] Патент № 2326447 Российская Федерация, МПК G09B 9/16. Динамический тренажер: № 2006139158/28: заявка 08.11.2006: опубл. 10.06.2008 / А.П. Суворов, Л.А. Фролов, В.Н. Киршанов [и др.]. – 14 с.: ил. – Текст: непосредственный.
- [4] Киршанов, В.Н. Центрифуги России, история создания и использования при подготовке космонавтов / В.Н. Киршанов // Материалы XII Международной научно-практической конференции. Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина. Звездный городок. – 2017. – С. 185–186.

REFERENCES

- [1] Kirshanov, V.N. Yu.A. Gagarin Cosmonaut Training Center. Centrifuge CF-18 – 40 Years for the Benefit of Domestic Cosmonautics (Part 1) / V.N. Kirshanov, A.P. Chudinov, I.N. Gavrik // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2022. – No 1(42). – P. 119–131.
- [2] Experimental Assessment of Carrying out Complex Operator Activity by Cosmonauts after Long-Duration Mission Aboard the Iss in the Interests of Human Space Exploration Beyond Low-Earth Orbit / S.K. Krikalev, B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov [et al.] // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2013. – No 4(9). – P. 24–35.
- [3] Patent No 2326447 Russian Federation, IPC G09B 9/16. Dynamic simulator: No 2006139158/28: application 08.11.2006: publ. 10.06.2008 / A.P. Suvorov, L.A. Frolov, V.N. Kirsanov [et al.]. – 14 p.: ill. – Text: direct.
- [4] Kirshanov, V.N. Centrifuges of Russia, History of Creation and Use in Training of Cosmonauts / V.N. Kirshanov // Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. Yu.A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center. Star City. – 2017. – P. 185–186.