

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА «ПРОБОЙ», СПЕЦИФИКА ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л.А. Умнова, Е.В. Попова, О.А. Лукьянова,  
С.П. Авершьев, А.Л. Половнев

Л.А. Умнова; канд. пед. наук Е.В. Попова; О.А. Лукьянова  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)  
Канд. техн. наук С.П. Авершьев (АО «ЦНИИмаш»)  
Канд. физ.-мат. наук А.Л. Половнев (ПАО «РКК «Энергия»)

В статье рассмотрены особенности подготовки космонавтов для работы с научной аппаратурой космического эксперимента «Пробой», специфика проведения и предварительные результаты космического эксперимента на борту МКС, задачи по совершенствованию научной аппаратуры и дальнейшему развитию эксперимента.

**Ключевые слова:** космический аппарат, космический мусор, метеороид, пробой гермооболочки, акустическая волна, подготовка космонавтов.

### **Results of Se “Proboi”, Features of Cosmonaut Training. Prospects for Further Researches. L.A. Umnova, E.V. Popova, O.A. Lukyanova, S.P. Avershyev, A.L. Polovnev**

The article discusses the features of training cosmonauts to deal with the scientific equipment of the “Proboi” space experiment, the specifics of the implementation and preliminary results of the space experiment aboard the ISS, the tasks of improving scientific equipment and the further development of the experiment.

**Keywords:** spacecraft, space debris, meteoroid, containment breakdown, acoustic wave, cosmonaut training.

Нарастающая засоренность околоземного космического пространства космическим мусором из-за активной человеческой деятельности увеличивает вероятность столкновения космических аппаратов (КА) с высокоскоростными частицами, в результате которого возможен пробой гермооболочки с возможными катастрофическими последствиями.

Особенно актуальной проблема является для обитаемых КА. При возникновении небольшой пробоины (площадью до нескольких десятков  $мм^2$ ) имеется техническая перспектива заделки отверстия силами экипажа. В этом случае важное значение имеет возможность оперативного определения места столкновения частицы с оболочкой, т.к. это позволяет своевременно оповестить экипаж и принять экстренные меры по устранению течи.

Одним из способов решения указанной проблемы является метод, основанный на анализе акустических волн, возникающих в атмосфере гермоотсека при пробое корпуса, и определении координат местоположения

источника звука, совпадающего с местом пробоя [1]. Этот способ положен в основу разработки системы оперативного определения координат пробоя (СОКП).

Принцип действия системы основывается на измерении разности времен прихода акустической волны в атмосфере гермоотсека от точки удара (пробоя) гермооболочки к акустическим датчикам (микрофонам), расположенным в различных точках гермоотсека по определенной схеме, и расчете по этим данным координат источника акустической волны. Возможность регистрации акустических воздушных волн исследовалась и полностью подтверждена в наземных экспериментах на установках АО «ЦНИИмаш» совместно с РКК «Энергия» по натурному пробую стенки гермоотсека при скоростях соударения до  $7 \text{ км/с}$  [2, 3].

С целью проверки метода оперативного определения координат места пробоя, тестирования созданной аппаратуры и разработанного программного обеспечения в условиях реального полета на борту российского сегмента Международной космической станции был организован космический эксперимент (КЭ) «Пробой». Предварительно метод определения координат пробоя был отработан в экспериментах, проведенных на комплексном стенде служебного модуля (СМ) в РКК «Энергия» и на тренажере российского сегмента Международной космической станции служебного модуля (РС МКС СМ) в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина.

Космический эксперимент «Пробой» проводится на борту российского сегмента МКС с декабря 2014 года. В эксперименте предусматривается выполнение следующих задач: получение характеристик постоянно действующих помех в реальных условиях полета для настройки пороговых уровней срабатывания системы оперативного определения координат точки пробоя; идентификация импульсных источников звука, действующих на борту СМ; определение характеристик воздушной среды в СМ, влияющих на скорость распространения звуковых волн; верификация метода оперативного определения координат точки пробоя с помощью имитатора акустической волны «пробоя» в натуральных условиях полета.

Имитатор акустической волны пробоя является важнейшим элементом аппаратуры. Характеристики акустической воздушной волны, получаемой в имитаторе, близки к характеристикам акустической волны реального пробоя, что подтверждено в наземных экспериментах по натурному пробую элементов конструкции КА. Принцип генерации импульсного звука в имитаторе основан на процессе разрыва латексной мембраны. На рисунке 1 показан вид излучателя имитатора акустической волны.

С 2014 года, начиная с МКС-39/40, в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» осуществляется подготовка космонавтов в составе основных и дублирующих экипажей и групп специализации и совершенствования по работе с научной аппаратурой КЭ «Пробой» на тренажере служебного модуля российского сегмента МКС (СМ РС МКС).

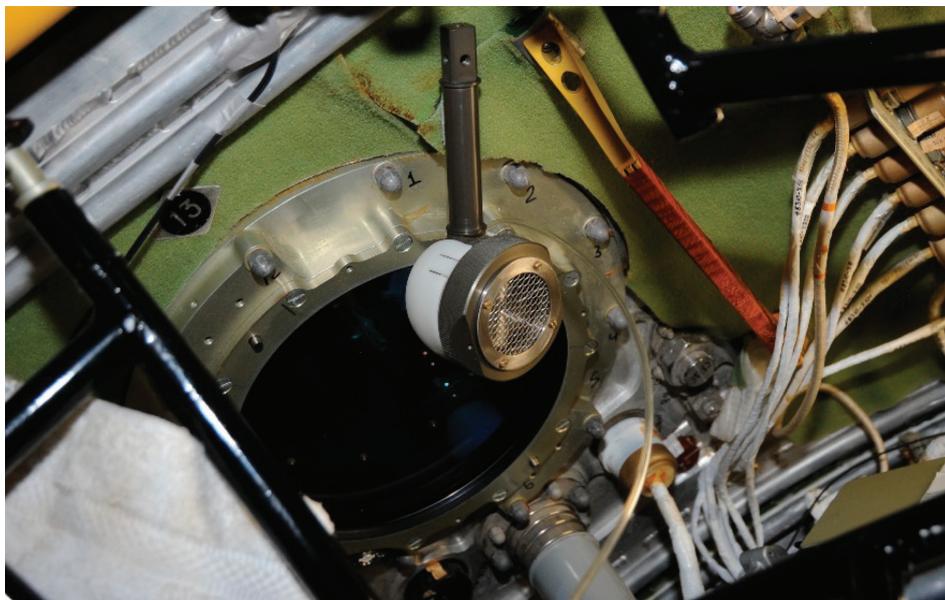


Рис. 1. Размещение излучателя имитатора акустической волны  
вблизи иллюминатора 13 в эксперименте на МКС

Основная цель подготовки космонавтов по КЭ «Пробой» заключается в получении космонавтами знаний и формировании навыков по выполнению эксперимента согласно бортовой документации по эксперименту с учетом особенностей космического полета.

Изучение КЭ «Пробой» позволит космонавтам:

1. Знать:
  - научные основы проведения КЭ «Пробой»;
  - научные основы, цели и задачи эксперимента;
  - состав научной аппаратуры и вспомогательного оборудования;
  - состав возвращаемого оборудования;
  - циклограмму выполнения эксперимента;
  - меры безопасности при выполнении эксперимента.
2. Сформировать навыки:
  - выполнения эксперимента «Пробой».
3. Уметь:
  - выполнять все штатные операции по работе с аппаратурой;
  - устранять расчетные нештатные ситуации по работе с аппаратурой;
  - соблюдать меры безопасности при выполнении работ с аппаратурой;
  - выполнять операции по техническому обслуживанию аппаратуры;
  - выполнять ремонт аппаратуры (по указаниям Земли).

Тематический план, определяющий количество часов, отведенных на изучение КЭ «Пробой», и формы занятий, приведен в таблице 1.

Таблица 1

## Тематический план проведения занятий по КЭ «Пробой»

Наименование тем	Количество часов				Примечание
	Теоретические занятия	Практические занятия	Тренировки	Всего	
Тема 1. РС НПИ «Пробой» Лекция Ознакомление	0,5	–	–	1	Класс
Тема 2. РС НПИ «Пробой» Практическое занятие	–	1	–	1	УТМ РС МКС, тренажер ИУС ЦПК
Тема 3. РС НПИ «Пробой» Практическое занятие Восстановление знаний	–	1	–	1	УТМ РС МКС, тренажер ИУС ЦПК
Зачетная тренировка	–	–	1	1	В рамках 4-часовой комплексной тренировки или типовых полетных суток или экзаменационной комплексной тренировки
ИТОГО:	1	2	1	4	

Подготовка космонавтов к проведению КЭ «Пробой» осуществляется как в виде теоретических занятий, так и практических занятий на тренажере СМ РС МКС (рисунок 2). Программа эксперимента отрабатывается на научной аппаратуре КЭ «Пробой», расположенной на тренажере СМ РС МКС. Во время тренировочных занятий обеспечивается функционирование бортовых систем тренажера СМ РС МКС.

Для занятий используется образец НА, идентичный применяемому на РС МКС, аналог бортового ноутбука RSE-1 и аналог бортовой точки доступа Wi-Fi. Тренировочные занятия по подготовке экипажа МКС к проведению КЭ включают сборку блоков НА внутри гермоотсека, закрепление микрофонов и кабелей на стенках изнутри гермоотсека модуля МКС и аппаратуры внутри гермоотсека, подключение и тестирование НА. Тренировки сеансов измерений проводятся в полуавтоматическом режиме. Также отрабатываются практические навыки по работе с имитатором пробоя и с программным обеспечением научной аппаратуры.



Рис. 2. Подготовка космонавта Н.В. Тихонова к работе с научной аппаратурой, экспедиция МКС-57/58

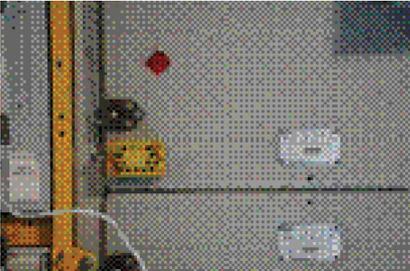
Постановщиком космического эксперимента «Пробой» и разработчиком научной аппаратуры является АО «ЦНИИмаш».

При организации подготовки к КЭ использовалась научная аппаратура «СОКП» и вспомогательное оборудование (таблица 2). Комплект научной аппаратуры эксперимента «Пробой» включает в себя два независимых регистрирующих блока: БПАС (блок преобразования акустических сигналов), АР (автономный регистратор) с вторичными источниками питания, комплект микрофонов в адаптерах, имитатор пробоя. БПАС размещается в рабочем объеме служебного модуля, АР используется как переносной регистратор и размещается поочередно в переходном отсеке (ПХО) СМ или переходной камере (ПрК) СМ. К каждому регистрирующему блоку подключено по шесть микрофонов. Микрофоны помещены в специальные адаптеры, исключающие их случайное повреждение, и закреплены с помощью велкро на панелях интерьера рабочего объема или вблизи гермооболочки в ПХО и ПрК.

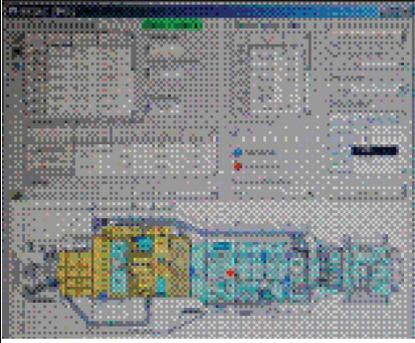
Все навыки, приобретенные космонавтами во время обучения, позволяют полностью отработать программу КЭ «Пробой», в т.ч. по эксплуатации научной аппаратуры в штатных и нештатных ситуациях.

Таблица 2

## Использование научной аппаратуры и вспомогательного оборудования при организации подготовки к КЭ «Пробой»

Название НА	Назначение НА	Фото НА	Размещение на РС МКС
<b>НА «СОКП»:</b>	Оперативное определение координат места пробоя корпуса гермоотсека		СМ
Блок преобразования акустических сигналов БПАС	Регистрация посредством шести микрофонов, установленных на элементах интерьера РО СМ в заранее выбранных местах, и обработки данных измерений амплитуды акустических волн в воздушной среде РО СМ		РО СМ в районе панели № 423
Автономный регистратор АР	АР предназначен для регистрации посредством шести микрофонов, установленных в ПхО/ПрК СМ в заранее выбранных местах, и обработки данных измерений амплитуды акустических волн в воздушной среде		ПхО или ПрК СМ
Имитатор пробоя	Создание акустической волны в воздушной среде		СМ
Микрофоны	Регистрация акустических волн в воздушной среде		РО на панелях интерьера, ПхО и ПрК

Окончание таблицы 2

Название НА	Назначение НА	Фото НА	Размещение на РС МКС
Бортовой лэптоп RSE-1	Вычислительная часть ПО, установленная на бортовом лэптопе, автоматически получает файлы от интерфейсной части ПО, после чего обрабатывает их с целью нахождения моментов времени прихода звуковой волны к микрофонам, рассчитывает и отображает координаты места пробоя в реальном масштабе времени		
Бортовая точка доступа Wi-Fi	Позволяет передавать файлы с регистрирующих блоков на бортовой лэптоп		

Наличие большого количества постоянно работающего оборудования, сложная конфигурация внутреннего интерьера, загромождение пространства приборами, кабельными трассами, воздуховодами и т.п. усложняют условия распространения волны и затрудняют решение задачи определения места пробоя. Основные затруднения при определении момента прихода переднего фронта акустической волны от места пробоя к микрофонам связаны со снижением ее амплитуды на 30–40 дБ при прохождении через приборный отсек, отделенный от рабочей зоны обитания космонавтов панелями интерьера. С учетом того, что уровень звука в атмосфере, генерируемого при пробое, составляет не менее 140 дБ на расстоянии 1 м от точки пробоя, а уровень фоновых шумов в рабочем отсеке составляет 60–70 дБА, можно достаточно надежно фиксировать акустическую волну пробоя после ее прохождения сквозь панели интерьера. Кроме того, при расположении микрофонов непосредственно на гермооболочке, перед фронтом воздушной звуковой волны зачастую можно наблюдать ее предвестника, связанного с более быстрым распространением волн по гермооболочке. Для отсеивания предвестника применяются специальные алгоритмы обработки сигнала. Также на погрешность определения момента прихода волны к датчику значительно влияют спектральные характеристики фоновых шумов и дифракция волн на элементах оборудования.

Все эти проблемы решаются при отработке системы оперативного определения координат места пробоя. В ходе эксперимента проводятся длительные и короткие сеансы измерений. В длительном сеансе аппара-

тура непрерывно работает в течение месяца в автоматическом режиме для непрерывного сбора информации об импульсных и постоянных шумах. В коротких сеансах измерений экипажем МКС проводится работа по имитации пробоя с целью верификации метода оперативного определения координат места пробоя. Перед сеансом уточняется скорость звука в воздушной среде по измерениям температуры атмосферы. В сеансе используются имитатор пробоя и бортовой лэптоп. В заранее выбранную точку на гермооболочке устанавливается излучатель имитатора пробоя. Если точка размещения находится в запанельном пространстве, то панель после размещения излучателя плотно закрывается. После этого имитатор приводится в действие. При срабатывании имитатора на экран бортового лэптопа выдаются координаты и изображение проекции модуля, на которой показано расчетное место пробоя.

Система использует беспроводной интерфейс Wi-Fi для передачи данных в коротких сеансах от регистраторов на бортовой лэптоп. В длительных сеансах данные по импульсным и фоновым шумам накапливаются на внутренних носителях регистраторов. Результаты коротких сеансов верификации с участием экипажа оперативно отправляются на Землю по существующим каналам связи. Основные результаты эксперимента из-за большого объема информации возвращаются на Землю на электронных носителях при завершении экспедиции.

К настоящему времени эксперимент проводили члены нескольких длительных экспедиций, начиная с экспедиции МКС-41/42 (А.М. Самокутяев, Е.О. Серова). В длительном сеансе измерений удалось провести более 50 коротких сеансов верификации метода оперативного определения координат пробоя. Моделирование пробоя выполнялось практически на всей поверхности гермооболочки служебного модуля (рис. 3), в том числе, в 15 точках (выделено курсивом) в запанельном пространстве модуля. Погрешность системы оперативного определения координат места пробоя, полученная как в загроможденном пространстве, так и в незагроможденном пространстве, рассчитывалась как расстояние от места установки излучателя имитатора пробоя до точки с расчетными координатами, выданными системой в коротких сеансах верификации. В соответствии с программой космического эксперимента ожидаемая точность определения места пробоя в незагроможденных зонах модуля составляет от 0,05 до 0,3 м, а в загроможденных – от 0,4 до 0,7 м.

Полученные погрешности в целом удовлетворяют требованиям программы КЭ «Пробой». Погрешность системы, реализованной в настоящее время, составляет 0,33 м (с вероятностью 95 %) при пробое как на открытых участках гермооболочки, так и на участках корпуса в загроможденном оборудованном пространстве, изолированном панелями интерьера от обитаемого объема модуля.

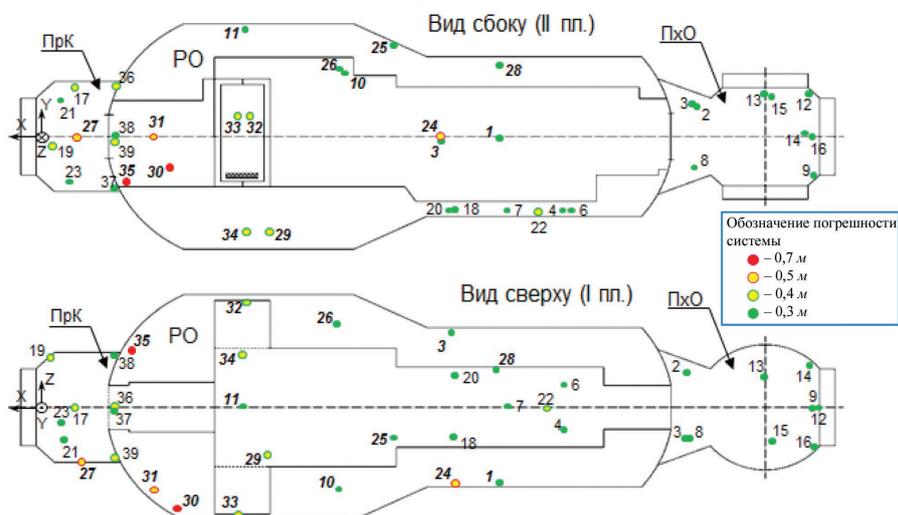


Рис. 3. Результаты верификации НА «СОКП» КЭ «Пробой»

Проведено значительное количество коротких сеансов внутри левой и правой кают РО, что связано с сильным затуханием в них акустических волн. В течение нескольких экспедиций удалось верифицировать методику определения координат места пробоя как в правой, так и в левой каютах после доработки алгоритма срабатывания и установки высокой чувствительности системы.

Испытания по синхронизации блоков БПАС и АР показали, что для определения места пробоя на всей гермоболочке ПрК необходимо использовать не менее трех датчиков внутри ПрК, синхронизированных с системой в РО СМ.

Результаты космического эксперимента показали работоспособность способа определения координат места пробоя и оптимальность схемы расстановки микрофонов внутри гермоотсеков СМ, выполненных в соответствии с патентом РФ № 2387966 [1], при этом научная аппаратура системы определения координат пробоя определяет координаты пробоя с предусмотренной точностью.

## Выводы

1. В ходе выполнения КЭ «Пробой» проведены испытания по имитации пробоя в 39 точках по всей поверхности СМ (рис. 3), в том числе в 15 точках (выделено курсивом) в запанельном пространстве модуля. В запанельном пространстве в 10 точках погрешность системы не превысила 0,4 м, в 3 точках – 0,5 м, в 2 точках – 0,7 м. С помощью флэш-накопителей на Землю передано ~250 Гб научной информации по импульсным источникам шума на борту СМ.

2. По данным измерений импульсных шумов, зарегистрированных на борту служебного модуля РС МКС, создана база данных типовых спектров сигналов, анализ которой показал принципиальную возможность идентификации импульсных шумов по их спектрам [4]. В настоящее время алгоритм идентификации импульсных шумов обрабатывается как на борту МКС, так и в ЦПК при обучении космонавтов.

3. Рассмотрены особенности подготовки космонавтов к выполнению КЭ «Пробой» на борту РС МКС. Опыт ее организационно-технического и методического обеспечения целесообразно учесть при подготовке космонавтов по другим КЭ, а также в будущем при выполнении сеансов верификации на борту ПКК.

4. В дальнейшей работе по КЭ «Пробой» запланированы: оптимизация размещения измерительных микрофонов и подбор их оптимального количества для увеличения точности определения координат; беспроводная синхронизация блоков научной аппаратуры для их привязки к единому моменту времени при размещении научной аппаратуры в различных модулях МКС; отработка передачи телеметрической информации на Землю. В перспективе планируется также повышение точности системы за счет регистрации электромагнитного импульса, возникающего при высокоскоростном пробое, автоматическое определение размеров пробойного отверстия и времени безопасности экипажа.

5. Результаты космического эксперимента планируется использовать для создания штатной системы оперативного определения координат места пробоя. Подобная система будет востребована при освоении космического пространства за пределами НОО, при осуществлении пилотируемых полетов к Луне и в дальний космос, в условиях, когда оперативность и точность определения координат места пробоя имеют критическое значение с точки зрения выживаемости экипажа.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авершьев С.П., Болотин В.А., Дементьев В.К., Дядькин А.А., Макаревич Г.А., Михайлов А.В., Пелипенко Л.Ф., Половнев А.Л., Рыбак С.П., Тихомиров Н.А. Устройство определения координат места пробоя гермооболочки пилотируемого космического объекта и способ определения координат места пробоя. Патент № 2387966 от 27.04.2010 г.
- [2] С.П. Авершьев, В.С. Будаев, Г.А. Макаревич, А.В. Михайлов, Л.Ф. Пелипенко, Н.А. Тихомиров, В.К. Дементьев, А.Л. Половнев, С.П. Рыбак, А.В. Сычев. Акустические волны в гермоотсеке космического аппарата при его пробое высокоскоростной частицей. – Космонавтика и ракетостроение. – 2011. – № 1(62). – С. 12–17.
- [3] С.П. Авершьев, Ю.М. Липницкий, Г.А. Макаревич, Н. Мамадалиев, Л.Ф. Пелипенко, А.Л. Половнев, А.С. Скалкин, П.В. Третьяков, А.Г. Шоколов. Пробой стенки гермоотсека космического аппарата высокоскоростной частицей с образованием акустических волн. Ученые записки ЦАГИ. – № 1. – Том XLVI. – 2015. – С. 42–51.

- [4] Зайцев К.И., Половнев А.Л. Идентификация импульсных шумов в Служебном модуле РС МКС. *Космическая техника и технологии.* – 2017. – № 4(19). – С. 105–110.

## REFERENCES

- [1] Aversyev S.P., Bolotin V.A., Dementiev V.K., Dyadkin A.A., Makarevich G.A., Mikhailov A.V., Pelipenko L.F., Polovnev A.L., Rybak S.P., Tikhomirov N.A. A device for determining the coordinates of location of containment breakdown in a manned spacecraft and a method for determining these coordinates. Patent No 2387966 dated 27.04.2010.
- [2] S.P. Avershev, V.S. Budaev, G.A. Makarevich, A.V. Mikhailov, L.F. Pelipenko, N.A. Tikhomirov, V.K. Dementiev, A.L. Polovnev, S.P. Rybak A.V. Sychev. Acoustic waves in the pressurized compartment of a spacecraft during its breakdown by a high-speed particle. – *Cosmonautics and Rocket Engineering.* – 2011. Issue 1(62). – pp. 12–17.
- [3] S.P. Avershev, Yu.M. Lipnitsky, G.A. Makarevich, N. Mamadaliev, L.F. Pelipenko, A.L. Polovnev, A.S. Skalkin, P.V. Tretyakov, A.G. Shokolov. Breakdown of a pressurized module's wall by a high-speed particle with the formation of acoustic waves. *Scientific notes of TsAGI.* – No 1. – Vol. XLVI. – 2015. – pp. 42–51.
- [4] Zaitsev K.I., Polovnev A.L. Identifying pulse noise in the Service Module of the ISS Russian Segment. *The Space Engineering and Technology magazine.* – 2017. Issue 4(19). – pp. 105–110.