

## Основные направления исследований в области физики и техники низких температур на российском сегменте Международной космической станции

Н.А. Анфимов<sup>1</sup>, Б.В. Бодин<sup>2</sup>, В.И. Лукьященко<sup>1</sup>,  
В.В. Суворов<sup>1</sup>, М.М. Цимбалюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Центральный научно-исследовательский институт машиностроения  
ул. Пионерская, 4, г. Королев, Московск. обл., 141070, Россия*

<sup>2</sup> *Российское авиационно-космическое агентство  
ул. Щепкина, 42, г. Москва, ГСП-6, 107996, Россия  
E-mail: vadim\_suvorov@hotmail.com*

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2002 г.

Изложены основные тенденции эволюционного развития долгосрочной программы исследований на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС), отражающие предполагаемые изменения окончательной конфигурации МКС, существующие предложения о проведении совместных экспериментов, стремление научной общественности к повышению эффективности и реальной практической отдачи программ, а также проанализированы основные направления исследований в области физики и техники низких температур на РС МКС.

PACS: 95.10.–a

При формировании утвержденных Генеральным директором Росавиакосмоса Ю.Н. Коптевым и Президентом Российской академии наук академиком Ю.С. Осиповым «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС» и «Программы реализации научно-прикладных исследований на российском сегменте МКС в период развертывания (1999–2003 гг.)» [1], учитывался громадный опыт российской космонавтики в области формирования программ исследований и их практической реализации на пилотируемых космических комплексах (ПКК) в период с шестидесятых годов прошлого века и до настоящего времени. Среди этих программ следует отметить «Программу научно-прикладных исследований, планируемых на орбитальном комплексе «Мир» в период 1997–1999 гг.», сформированную в 1997 г. на основе открытого конкурса проектов.

Для разработки на конкурсной основе долгосрочной программы исследований и программы исследований на этапе развертывания РС МКС, а также с целью обеспечения возможности эволюционного развития и совершенствования указанных программ с учётом

преемственности новых и ранее выполненных исследований, совместным решением Российского авиационно-космического агентства (Росавиакосмоса) и Российской академии наук в 1994 г. был создан и успешно функционирует Координационный научно-технический совет (КНТС) Росавиакосмоса, в задачи которого входит формирование и научно-техническое обеспечение реализации программ исследований и экспериментов на пилотируемых космических комплексах. По существу КНТС Росавиакосмоса является коллегиальным экспертным советом, осуществляющим стратегическое планирование исследований на пилотируемых космических комплексах (ПКК). В отдельных случаях члены Совета подключаются к решению наиболее сложных и ответственных проблем тактического планирования и мониторинга хода реализации исследований на РС МКС с выработкой конкретных рекомендаций в области целевого использования РС МКС.

Необходимые научно-методические подходы, а также механизмы формирования и обеспечения реализации программ научно-прикладных исследований и экспериментов были отработаны в процессе формирования и выполнения ранее упомянутой «Программы научно-прикладных исследований, планируемых

на орбитальном комплексе «Мир» в период 1997–1999 гг.» и в ходе разработки программы «Наука – НАСА», в которой американской стороне было предложено 165 проектов совместных экспериментов по различным направлениям исследований на орбитальных станциях, отобранных из 210 предложений. Проекты, входившие в программу «Наука – НАСА», обсуждались и получили одобрение на трёх совместных симпозиумах, вызвали большой интерес международной научной общественности, однако, к глубокому сожалению, до настоящего времени не приняты к реализации.

КНТС Росавиакосмоса состоит из 11 секций, возглавляемых наиболее авторитетными российскими учеными и специалистами в соответствующих областях научных исследований. Каждая из секций определяет приоритеты исследований по своим научным направлениям, с учетом предложений по совместным исследованиям и контрактным коммерческим работам, на основе которых осуществляется финансирование рекомендованных к реализации проектов. Общую увязку разрабатываемых проектов и подготовку конкретных предложений по их практическому выполнению проводит Секция комплексного анализа и формирования программ с привлечением ученых и специалистов ЦНИИМАШ и РКК «Энергия» им. С.П. Королева. В перерывах между заседаниями КНТС Росавиакосмоса и его Президиума текущую работу выполняет Оперативная рабочая группа КНТС Росавиакосмоса. Как следует из сопоставления функций экспертных структур международных партнеров по созданию и целевому использованию МКС, КНТС Росавиакосмоса совмещает ряд функций Экспертного совета НАСА и Совета по использованию МКС.

Существующая в настоящее время долгосрочная российская программа экспериментов на РС МКС предусматривает реализацию более 300 проектов, отобранных на основе открытого конкурса из более чем 400 предложений. При этом необходимо подчеркнуть, что в программе заранее предусмотрена возможность эволюционного развития принятых направлений исследований. В связи с этим предполагается регулярное обсуждение очередных версий долгосрочной программы с учётом сложившейся ситуации с финансовыми, материальными и бортовыми ресурсами, результатов завершённых исследований, поступивших предложений о проведении совместных научных и коммерческих исследований.

В настоящее время рассматривается возможность участия в совместных работах учёных Республики Беларусь, завершается разработка «Совместной российско-украинской программы научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС», предусматривающей выполнение 48 ак-

туальных и значимых в научном и практическом отношении исследований. Особое внимание при проведении этих работ уделяется выработке взаимно приемлемых условий такого сотрудничества. В первую очередь это относится к определению взаимных обязательств и ответственности участников, условий оплаты работ, обеспечению конфиденциальности и защиты интеллектуальной собственности, а также прав на использование полученных результатов. Представляется, что главным результатом этой деятельности должно стать формирование программ совместных исследований по различным научным направлениям, осуществляемых на взаимовыгодной основе.

Несмотря на известные трудности, строительство МКС продолжается. Однако окончательная версия конфигурации Международной космической станции до сих пор не согласована, что затрудняет создание четкой программы целевого использования МКС. С другой стороны, существующая неопределенность побуждает международных партнеров искать более эффективные формы международного сотрудничества в области целевого использования МКС. Например, в настоящее время проводится обсуждение возможности разработки и реализации на МКС совместной программы Росавиакосмоса, Европейского космического агентства ЕКА и Европейской Комиссии в области наук о жизни и физических наук в космосе.

НАСА выступила с инициативой разработки взаимоувязанной международной программы по целевому использованию МКС в период 2004–2008 гг.

Эти обстоятельства необходимо учитывать при обсуждении планов основных направлений исследований в области физики и техники низких температур на борту РС МКС (см. таблицу). Актуальность и перспективность низкотемпературных исследований в космическом пространстве подтверждают отечественные и зарубежные аналитики, которые полагают, что низкотемпературные технологии являются ключевыми и во многом определяют направление развития космической науки и техники в новом тысячелетии. Это связано как с созданием прецизионной контрольно-измерительной аппаратуры и топливных элементов нового поколения, так и с возможностью проникновения в ранее недоступные области научных исследований.

Например, в утвержденную долгосрочную программу включен проект «Гелий», в рамках которого предусмотрено изучение явлений на границе раздела «Сверхтекучий гелий – пар», а также на границе «Жидкий гелий – твердое тело» в условиях микрогравитации. Проект «Солитон», посвященный изучению стационарных и динамических нелинейных яв-

Таблица

Основные направления исследований в области физики и техники низких температур на российском сегменте Международной космической станции

Условное наименование экспериментов	Содержание исследований	Выполняемые этапы работ	Основные предполагаемые участники работ	Основные результаты предварительной экспертизы
«Гелий»	Фундаментальные исследования на межфазной поверхности гелия	КЭ включен в утвержденную программу исследований. Прорабатываются варианты практической реализации	МЭИ, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК и др.	Эксперимент актуален. Требуется проработка вопросов эффективной и безопасной реализации
«Солитон»	Фундаментальные исследования нелинейных явлений на поверхности конденсированного водорода	КЭ включен в утвержденную программу исследований. Прорабатываются варианты практической реализации	ИФТТ РАН, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК	Эксперимент актуален. Требуется проработка вопросов эффективной и безопасной реализации
«Субмиллиметр»	Фундаментальные астрофизические исследования в недоступном с Земли субмиллиметровом диапазоне электромагнитных волн с использованием криогенного телескопа	КЭ включен в утвержденную программу исследований. Прорабатываются варианты практической реализации	АКЦ ФИРАН, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК с широкой внутренней и международной кооперацией	Эксперимент актуален. Требуется проработка вопросов эффективной и безопасной реализации
«Волна-3 МКС»	Исследования в области тепломассообмена и гидродинамики в баке с криогенной жидкостью	КЭ включен в утвержденную программу. Ведется разработка необходимой аппаратуры и оборудования	ИЦ им. М.В. Келдыша, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК	Эксперимент актуален и значим в научном и практическом отношении. Рекомендован к реализации
«БСМК»	Отработка процессов высушивания биопрепаратов с использованием бортового сублимационно-морозильного комплекса (БСМК)	КЭ включен в утвержденную программу. Согласованы технические задания (ТЗ). Ведется разработка оборудования	РАО «Биопрепарат», АООТ «Биохиммаш», РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК	Эксперимент актуален и значим в научном и практическом отношении. Рекомендован к реализации
«Криоконсервация»	Отработка методов и технических средств криогенной консервации биологических препаратов на РС МКС	КЭ включен в утвержденную программу. Согласованы ТЗ. Ведется разработка методик и оборудования	РАО «Биопрепарат», АООТ «Биохиммаш», РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК	Эксперимент актуален и значим в научном и практическом отношении. Рекомендован к реализации
«Полигон-1»	Отработка методов качественного и количественного определения загрязнения атмосферы и земной поверхности с использованием криогенных ИК-газоанализаторов	КЭ включен в утвержденную программу. Ведется согласование ТЗ	ЦНИИМАШ с кооперацией	Необходима проработка вариантов практической реализации
Группа космических экспериментов (ГКЭ) «Кипение»	Фундаментальные исследования в области физики низких температур, отработки методов и средств эффективного и безопасного выполнения криогенных экспериментов в инфраструктуре РС МКС	Предложена в рамках «Совместной российско-украинской программы научных и технологических экспериментов на РС МКС». Разработано и согласовывается ТЗ	ЦНИИМАШ, ФТИНТ НАНУ, МЭИ, ИФП РАН, РИЦ «Курчатовский институт», ИФТТ РАН, ФИРАН, ИВТАН с кооперацией	ГКЭ актуальна и значима в научном и практическом отношении. Необходимо проработка вариантов эффективной и безопасной практической реализации
«Единство»	Фундаментальные и прикладные исследования в области физики и техники низких температур	ГКЭ предложена для включения в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований на РС МКС». Разработано ТЗ	ЦНИИМАШ, НИИ ЯФ МГУ, РКК «Энергия» с кооперацией	Требуется проработка вариантов практической реализации

Условное наименование экспериментов	Содержание исследований	Выполняемые этапы работ	Основные предполагаемые участники работ	Основные результаты предварительной экспертизы
«Криокомплекс»	Научные и прикладные исследования в обеспечении реализации единого комплекса бортового криогенного оборудования с целью реализации группы однородных низкотемпературных экспериментов	ГКЭ предложена для включения в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований на РС МКС». Разработано ТЗ	ЦНИИМАШ, МЭИ, РКК «Энергия» с кооперацией	КЭ актуален. Необходима проработка вариантов практической реализации в инфраструктуре РС МКС
«Кристаллизатор»	Фундаментальные и прикладные исследования физических процессов кристаллизации белков с использованием криогенных технологических сред	ГКЭ предложена для включения в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований на РС МКС». Разработано ТЗ	ЦНИИМАШ, ИК РАН	КЭ актуален и может быть рекомендован к реализации уже на этапе развертывания РС МКС
«АМС»	Реализация фундаментальных физических и астрофизических исследований с использованием альфа магнитного спектрометра со сверхпроводящей магнитной системой	Предложение профессора Сэмюэла Тинга об участии российских ученых и специалистов в реализации проекта	НИИ ЯФ МГУ, РНЦ «Курчатовский институт»	Проводятся оценки эффективности и целесообразности участия России в реализации проекта

лений на заряженной поверхности жидкого водорода, будет способствовать существенному развитию теории нелинейных явлений на поверхности жидкости и, в частности, экспериментальной проверке возможности создания сверхчувствительного гравиметра нового типа.

Включенный в долгосрочную программу высокоприоритетный эксперимент «Субмиллиметр» предусматривает проведение астрономических наблюдений в 12 спектральных интервалах, охватывающих диапазон 3 мкм–1,5 мм, с использованием криогенного космического телескопа с рекордными чувствительностью и угловым разрешением. Важность фундаментальных исследований в этом диапазоне для дальнейшего развития существующих представлений в области внеатмосферной астрономии и астрофизики обусловлена тем, что в нём наиболее сильно проявляются свойства остывшего вещества Вселенной, изучение которых позволило бы получить дополнительную информацию об эволюции вещества, процессах формирования звезд и планет и о происхождении жизни. В криогенном телескопе детекторы и оптика телескопа расположены внутри криостата с запасом жидкого гелия около 200 л, что совместно с многоступенчатой системой радиационных экранов и активной системой охлаждения внутренних экранов и бленды объектива по предварительным оценкам может обеспечить время активного существования на орбите не менее 1 года.

По научному направлению «Космическая биотехнология» утвержденной программой предусмотрены два эксперимента, ориентированные на технологическое использование бортовой низкотемпературной техники. Это эксперимент «БСМК», включающий натурную отработку бортового сублимационно-морозильного комплекса (БСМК), предназначенного для сублимационной сушки биопрепаратов в условиях космического полета, а также эксперимент «Криоконсервация», посвященный разработке криогенных методов консервации биологических препаратов с целью повышения надежности сохранения исследуемых и произведенных на борту биоматериалов.

Криогенные технологии предполагается использовать для повышения чувствительности детекторов и разрешения регистрирующей аппаратуры в экспериментах, проводимых в рамках проекта «Полигон-1», посвященного отработке технологии, методик и алгоритмов качественного и количественного анализа загрязнения атмосферы и земной поверхности вредными веществами.

Наконец, последний из числа утвержденных низкотемпературных экспериментов — проект «Волна-3 МКС» предусматривает исследования процессов теплообмена и гидродинамики в двухфазной криогенной среде при длительном воздействии микрогравитации с целью решения проблем создания и применения перспективных космических двигательных установок.

В рамках подготовки «Совместной российско-украинской программы научных исследований и

технологических экспериментов на РС МКС» учеными ФТИНТ НАНУ был предложен эксперимент «Пента – Кипение», который включен в серию космических экспериментов «Кипение» с участием российских специалистов и предусматривает изучение влияния микрогравитации на процессы кипения жидкого гелия и решение следующих задач: исследование роста и отрыва паровых пузырей в жидком гелии (ЖГ) при различных уровнях гравитации и свойствах поверхностей кипения; исследование теплообмена, устойчивости режимов кипения к локальным температурным возмущениям и динамики кризисных переходов от режима пузырькового кипения к режиму пленочного кипения при различных условиях микрогравитации; изучение динамики межфазной поверхности «ЖГ – пар», теплообмена и кризисных переходов к режиму пленочного кипения на границе «Сверхтекучий гелий – твердая стенка» при различных уровнях микрогравитации. В процессе рассмотрения этих предложений были высказаны рекомендации о включении в группу космических экспериментов работы по изучению нелинейных явлений в жидком гелии с учетом влияния температурных полей, давления и свойств различных поверхностей на конвекцию и теплообмен в условиях микрогравитации.

Обсуждается возможность реализации на РС МКС комплексного космического эксперимента «Единство», ориентированного на совместное использование мощной криомагнитной системы и широкого комплекса измерительной научной аппаратуры. Предлагаемая программа исследований включает: исследование свойств искусственной магнитосферы и процессов ее взаимодействия с ионосферной плазмой, нейтральным газом и пучками заряженных частиц; исследование физических проблем реализации магнитной радиационной защиты космических аппаратов; изучение силового взаимодействия искусственной магнитосферы с магнитным полем Земли и оценка возможности его использования для управления угловой ориентацией космического аппарата (КА); исследование поведения криогенных жидкостей в космических условиях и отработка основных проектно-конструкторских решений в области создания бортового криогенного оборудования и соответствующей научной аппаратуры.

Предложение по реализации эксперимента «Криокомплекс» направлено на создание эффективного криогенного комплекса для бортовых научных исследований, определения и отработки оптимальных алгоритмов управления процессом функционирования унифицированного оборудования, а также на решение фундаментальных проблем влияния объемных сил, теплообмена и тепломассопереноса на структуру и

физические свойства жидкого состояния вещества. Предполагается, что этот проект может быть реализован на борту транспортного грузового корабля «Прогресс», возможно, в пристыкованном к РС МКС состоянии. Научное оборудование предполагается разрабатывать в габаритах шар-баллонов отсека компонентов дозаправки таким образом, чтобы устанавливать на месте одного из этих баллонов. Рассматриваются варианты как автономного выполнения эксперимента на борту грузового транспортного корабля «Прогресс», так и с привлечением ресурсов станции.

В настоящее время активно изучаются возможности использования криогенных технологических сред в бортовых экспериментах в области биотехнологии. В частности, предложение по реализации эксперимента «Кристаллизатор» предусматривает использование криогенных сред для кристаллизации биологических макромолекул и получения биокристаллических пленок в условиях микрогравитации. Целью предлагаемых экспериментов является исследование процессов кристаллизации белков для получения монокристаллов белков совершенной структуры, пригодных для рентгеноструктурного анализа.

С участием научных и промышленных организаций ряда стран идет подготовка к проведению на борту МКС экспериментов по поиску антивещества в космическом пространстве с использованием уникального бортового прибора – альфа магнитного спектрометра (проект «АМС»). В проекте предполагается использовать магнитную систему на основе охлаждаемых гелием сверхпроводящих соленоидов (запас жидкого гелия ~ 2500 л), прецизионную измерительную аппаратуру с криогенным охлаждением. В настоящее время завершается проработка вопросов возможности и целесообразности официального участия российских ученых в реализации проекта.

Как видно из изложенного, эксперименты в области физики и техники низких температур занимают в программе исследований на РС МКС достаточно весомое место. В связи с этим были проведены необходимые проектные проработки для выбора оптимальной с точки зрения обеспечения достаточного уровня эффективности и безопасности схемы проведения низкотемпературных экспериментов.

Оценки показывают, что один из путей повышения эффективности криогенных исследований – оборудование на РС МКС криогенного унифицированного рабочего места (КУРМ). Это позволило бы объединить разрозненные низкотемпературные эксперименты в единый комплекс с рациональным расходом ресурсов. Предлагаются также варианты размещения КУРМ на свободно летящем и присоединенном обслу-

живаемых модулях, включаемых в инфраструктуру РС МКС. Использование автономного свободно летящего модуля обеспечивает высокую надежность и полноту выполнения программы исследований, но требует дополнительных материальных затрат. Один из возможных вариантов отработки концепции КУРМ — размещение его основных элементов и выполнение запланированных низкотемпературных экспериментов на штатном транспортном грузовом корабле типа «Прогресс», поскольку при приемлемых надежности и загрузке экипажа он требует наименьших затрат и может быть рекомендован к реализации.

1. V.F. Utkin, V.I. Lukjashchenko, V.V. Borisov, V.V. Suvorov, and M.M. Tsymbaljuk, *J. Low Temp. Phys.* **119**, 183 (2000).

## Major trends of low-temperature physics and technology on International Space Station Russian Segment

N.A. Anfimov, B.V. Bodin, V.I. Lukjashchenko, V.V. Suvorov, and M.M. Tsymbaljuk

The main trends of evolutionary development of the Long-Term Research and Experiment Program on the International Space Station Russian Segment (ISS RS) are reported. They take into account the proposed modification of the ISS final configuration, the existing proposals on joint research, the tendencies of the world scientific community to improve productivity of research programs on the ISS. The basic lines in low-temperature physics and technology are considered.