

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ С АППАРАТУРОЙ «ДАКОН-П» НА ТРАНСПОРТНОМ ГРУЗОВОМ КОРАБЛЕ «ПРОГРЕСС»

© 2019

- Д. М. Аюкаева** инженер;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
diana.ayukaeva@rsce.ru
- И. А. Бабушкин** кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой
общей физики;
Пермский государственный национальный исследовательский
университет;
info@psu.ru
- М. Ю. Беляев** доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя
научно-технического центра, начальник отдела;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
mikhail.belyaev@rsce.ru
- Е. А. Зильберман** заведующий лабораторией;
Пермский государственный национальный исследовательский
университет;
zilberman_e@mail.ru
- Т. В. Матвеева** заместитель начальника отдела – начальник сектора;
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва, г. Королёв;
tatiana.matveeva@sfoc.ru
- А. С. Сидоров** заведующий лабораторией;
Пермский государственный национальный исследовательский
университет;
info@psu.ru

Для проведения экспериментов по изучению конвекции в условиях микрогравитации предлагается использовать транспортный грузовой корабль (ТГК) «Прогресс». Это обуславливается тем, что микрогравитационная обстановка на борту российского сегмента (РС) международной космической станции (МКС) не является благоприятной, так как центр масс МКС находится на американском сегменте, а многие бортовые системы, создающие микроперегрузки, размещены на РС. На ТГК отсутствует экипаж и бортовые системы жизнеобеспечения, микроперегрузки на нём значительно ниже, чем на РС МКС. Особенно благоприятными для выполнения космического эксперимента в области микрогравитации являются пассивные режимы ориентации ТГК. В ходе проведения ряда экспериментов на ТГК по выявлению минимального уровня остаточных микроускорений выяснилось, что наиболее подходящим для этого режимом является режим гравитационной ориентации. Планируется провести эксперимент по изучению конвективных течений со специально разрабатываемой для этих целей научной аппаратурой «Дакон-П» на ТГК «Прогресс» в его автономном полёте в режиме гравитационной ориентации.

Конвекция; микроускорения; транспортный грузовой корабль «Прогресс»; методы управления.

Цитирование: Аюкаева Д.М., Бабушкин И.А., Беляев М.Ю., Зильберман Е.А., Матвеева Т.В., Сидоров А.С. Эксперименты по изучению конвективных течений с аппаратурой «Дакон-П» на транспортном грузовом корабле «Прогресс» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 7-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-7-17

Введение

Первые систематические исследования конвекции в микрогравитационном поле были выполнены на орбитальной станции «Мир» в 1998 – 2000 гг. с прибором «Дакон» [1]. Прибор представлял собой конвективную камеру (датчик течений) и блок управления и сбора информации, подключённый к портативному персональному компьютеру. Основной идеей конвективного датчика является метод слабых конвективных течений, возникающих в результате действия различных составляющих микроускорения на жидкость. После анализа результатов космических экспериментов (КЭ), выполненных с датчиком «Дакон», был сделан вывод о недостаточной его чувствительности.

Для реализации программы исследований на МКС прибор «Дакон» был модернизирован и получил название научной аппаратуры (НА) «Дакон-М». Она применялась в рамках технического эксперимента «Изгиб» на МКС с 2008 г. [2]. Модернизация датчика заключалась в использовании конвективной камеры большего размера и применении в качестве рабочего тела углекислого газа давлением 2 атм вместо воздуха давлением 1 атм. За счёт этого чувствительность выросла примерно на два порядка.

Научная аппаратура «Дакон-М» представляет собой полость в форме цилиндра, заполненную углекислым газом. Диаметр и высота цилиндра имеют одинаковое значение $L = 10$ см. На противоположных основаниях цилиндра поддерживается фиксированная разность температур $\Delta T = (5 \div 65)^\circ\text{C}$. Внутри полости установлены две дифференциальные термодатчики для измерения разностей температур в двух парах фиксированных точек. Эти разности температур – измерения датчика. Они выдаются в цифровом виде с шагом 1 с.

Проведение экспериментов с датчиками конвекции позволило сделать выводы, что в ходе исследований была надёжно зафиксирована конвекция под влиянием микроускорений, а также были зафиксированы конвективные всплески. Конвективные всплески объясняются тем, что в различных точках космического аппарата микрогравитационная обстановка различна.

Силы, вызывающие микроускорения, не только сложны по своему составу, но имеют и сложный временной характер. Суммарный вектор остаточных ускорений может испытывать колебания как по модулю, так и по направлению. Характер этих колебаний связан со многими факторами, но основным из них является динамика полёта КА.

В настоящее время реализуется программа выполнения экспериментов с датчиком «Дакон-П» на ТГК «Прогресс» в их автономном полёте. Проведение экспериментов на ТГК привлекает возможностью создания разнообразной микрогравитационной обстановки [3]. На борту российского сегмента МКС подходящие условия для подобных экспериментов возникают нечасто. Следует отметить, что микрогравитационная обстановка на российском сегменте нестабильна из-за работы бортового оборудования, деятельности экипажа, стыковок/расстыковок кораблей и т.д.

Использование ТГК для проведения экспериментов в области микрогравитации

В отличие от российского сегмента МКС, где остаточные микроускорения достаточно велики, на ТГК «Прогресс» возможны такие режимы полёта, при которых используется минимальное количество оборудования, создающего микроперегрузки [4]. На ТГК отсутствует экипаж, с которым также связаны определённые микроперегрузки.

Главной особенностью и основным преимуществом использования ТГК «Прогресс» в качестве платформы для реализации научных экспериментов является тот факт, что с их помощью можно создать минимальные или заданные (калиброванные)

значения микроускорений [5]. Минимальный уровень микроускорений обеспечивается при использовании гравитационной ориентации ТГК и специальных способов управления ТГК.

На ТГК «Прогресс» используется штатный режим закрутки корабля вокруг оси, перпендикулярной к плоскости солнечных батарей (СБ) и направленной на Солнце. С помощью измерений угловой скорости вращения ТГК и величины тока, получаемого от СБ, оказывается возможным определить угловое движение ТГК в режиме закрутки и уточнить тензор инерции корабля, в том числе углы, определяющие рассогласование строительных осей ТГК и главных центральных осей инерции корабля. Опыт обработки измерений в режимах закрутки ТГК показывает, что движение корабля должно быть при этом близким к невозмущённому, иначе возникают серьёзные вычислительные проблемы, что неприемлемо при оперативном управлении полётом. Факторы, способствующие возмущению углового движения ТГК, связаны с действующими гравитационными и аэродинамическими моментами. Выбирая угловую скорость закрутки ТГК, длительность интервала обработки измерений и учитывая взаимное положение оси закрутки и плоскости орбиты корабля, можно получить движение ТГК, близкое к невозмущённому. Движение ТГК, близкое к невозмущённому, обеспечивается, например, выбором угловой скорости вращения ТГК и интервала обработки.

Тензор инерции ТГК в этом случае по измеренным параметрам определяют минимизацией функционала

$$\Phi_{\Omega} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 \left[\Omega_i^{(n)} - \Omega_i(t_n) \right]^2$$

на решениях системы уравнений (системы уравнений Эйлера, записанных в безразмерном виде):

$$\dot{\omega}_1 = \mu \omega_2 \omega_3, \quad \dot{\omega}_2 = \frac{\mu' - \mu}{1 - \mu\mu'} \cdot \omega_3 \omega_1, \quad \dot{\omega}_3 = -\mu' \omega_1 \omega_2,$$

где $\mu = \frac{I_2 - I_3}{I_1}$, $\mu' = \frac{I_2 - I_1}{I_3}$, $\Omega_i = \sum_{k=1}^3 \epsilon_{ik} \omega_k$ ($i = 1, 2, 3$),

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – компоненты угловой скорости на главные центральные оси инерции; I_1, I_2, I_3 – моменты инерции космического аппарата (КА); ϵ_{ik} – элементы матрицы перехода между системами координат, образованными строительными осями и главными центральными осями инерции КА; $\Omega_i^{(n)}$ – приближённые измеренные значения компонентов угловой скорости в строительной системе координат.

Минимизация Φ_{Ω} является первым этапом определения искомым величин и осуществляется методом Гаусса-Ньютона. Φ_{Ω} рассматривается как функция набора из восьми параметров $\omega_{i_0} = \omega_i(t_0)$ ($i = 1, 2, 3$), $\mu, \mu', \gamma, \alpha, \beta$. Углы γ, α, β задают положение строительной системы координат относительно системы координат, образованной главными центральными осями инерции КА.

Как показывает опыт обработки информации, искомые параметры практически всегда могут быть определены при минимизации функционала Φ_{Ω} .

На втором этапе для повышения надёжности определения параметров тензора инерции ТГК минимизируется функционал, составленный аналогично по измеренным направлениям на Солнце.

Определив истинное положение главных центральных осей инерции ТГК, можно осуществлять управление с учётом их положения относительно строительных осей КА.

Для обеспечения устойчивой одноосной гравитационной ориентации и прихода электроэнергии от СБ при нахождении Солнца вблизи плоскости орбиты была предложена технология выполнения закрутки ТГК вокруг продольной оси Ox в определённый момент времени и с определённой скоростью. Закрутка ТГК выполняется при выходе корабля из тени Земли в направлении, соответствующем уменьшению угла между направлением перпендикуляра к активной поверхности СБ и направлением на Солнце. В этом случае панели СБ, расположенные по осям, соответствующим среднему моменту инерции ТГК и лежащие в плоскости орбиты, начинают освещаться солнечным светом. Угловая скорость закрутки принимается равной $360^\circ/T$, где T – период обращения ТГК по орбите. Это обеспечивает приход электрической энергии от СБ ТГК практически на всём освещённом Солнцем участке орбиты. При этом сохраняется одноосная гравитационная ориентация ТГК и обеспечивается необходимая для получения электроэнергии освещённость СБ. При выполнении КЭ с НА «Дакон-П» на ТГК «Прогресс» планируется дополнительно установка измерителя микроускорений КАП и феррозондового магнитометра.

Продолжительность автономного полёта ТГК около 30 суток. Эксперименты начинаются после расстыковки ТГК с МКС и формирования орбиты для проведения КЭ при помощи коррекции орбиты ТГК. Выбор орбиты определяется требованиями обеспечения безопасности МКС и распределения средств управления наземного контура между ТГК и МКС. Для подзаряда аккумуляторных батарей ТГК реализуется режим солнечной ориентации и закрутки на Солнце (СОЗ). Номинальная угловая скорость закрутки в режиме СОЗ составляет 2,2 град/с. Эксперименты, требующие минимального уровня микрогравитации, проводятся в режиме гравитационной ориентации. Для обеспечения заданного уровня микроускорений ТГК дополнительно придаётся угловое вращение со скоростью, соответствующей получению требуемых микроускорений. Для возврата НА на борт МКС необходимо выполнить повторную стыковку ТГК с МКС. Длительность повторного сближения и стыковки со станцией составляет около двух суток. Расход топлива составляет 120-180 кг.

Эксперименты по выполнению режимов закрутки и поддержанию гравитационной ориентации проведены на ряде ТГК «Прогресс» и подтвердили эффективность предлагаемых методов [6-8].

Кроме того, важно отметить, что грузовые корабли постоянно используются в программе МКС. Регулярные полёты ТГК к станции позволяют разработать схему плановой реализации экспериментов. Перед расстыковкой со станцией на ТГК «Прогресс» размещается оборудование для проведения экспериментов. После выполнения экспериментов осуществляется повторная стыковка ТГК со станцией и это оборудование возвращается на станцию. ТГК «Прогресс» затем вновь отстыковывается от станции и завершает свой полёт по штатной схеме.

Научная аппаратура «Дакон-П»

Для проведения исследований по изучению конвективных потоков в условиях микрогравитации во время автономного полёта ТГК «Прогресс» готовится НА «Дакон-П».

С помощью НА «Дакон-П» в космическом эксперименте «Изгиб» будут решаться следующие научные задачи:

- получение и измерение устойчивых конвективных потоков в неоднородных по плотности газообразных средах, заключённых в герметичной цилиндрической полости, в условиях микрогравитационной обстановки на борту ТГК «Прогресс»;
- изучение влияния динамических и инерционных воздействий (изменение орбиты КА, закрутка КА) на параметры и развитие конвективных потоков в рабочей полости конвективной камеры НА «Дакон-П»;
- определение критических уровней микроускорений, существенных для формирования конвективных потоков и температурных полей в газовых средах, растворах, расплавах, влияющих на качество материалов, получаемых в условиях микрогравитации;
- разработка рекомендаций и требований к сертификации гравитационно-чувствительных технологических установок, размещаемых на борту ТГК «Прогресс»;
- уточнение математических моделей поведения жидкостных и газовых систем в условиях микрогравитации при активных управляющих воздействиях и наличии фоновых вибраций на борту ТГК «Прогресс».

Исследование конвективного теплопереноса в НА «Дакон-П» проводится по искажению температурного поля в газовой среде цилиндрической рабочей полости с помощью дифференциальных термопар. Градиент температуры задаётся горячим и холодным теплообменниками на торцах полости. В отсутствие внешнего инерционного воздействия изотермические поверхности в жидкости представляют собой плоскости, параллельные теплообменникам (рис. 1). При расположении спаев дифференциальных термопар в данной плоскости значение термо-ЭДС будет равно нулю. При наличии составляющей ускорения, перпендикулярной оси цилиндрической полости, возникает конвективное течение, искривляющее изотермическую поверхность, что приводит к возникновению значения термо-ЭДС, отличного от нулевого.

Технические характеристики НА «Дакон-П» представлены в табл. 1.

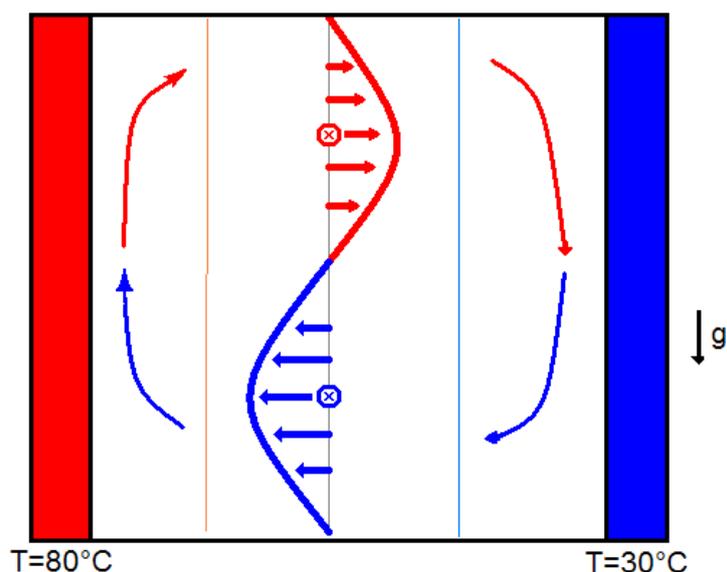


Рис. 1. Изолинии температуры в газе или жидкости в отсутствие и при наличии конвективного течения

Таблица 1. Технические характеристики НА «Дакон-П»

Наименование	Значение
Масса общая, кг, не более	10,12
Габаритные размеры: конвективной камеры с кронштейном, мм; блока управления и сбора данных, мм	212×204×180 320×214×88
Напряжение питания, В	23-39
Мощность потребления НА, Вт, не более: - номинальная (при включённом нагревателе); - пиковая (за время не более 20 мс)	42 400
Давление в рабочей полости конвективной камеры, кПа: в выключенном состоянии (без нагрева); в рабочем состоянии (с учётом нагрева)	400 500
Газовая среда в рабочей полости	углекислый газ
Динамический диапазон измерений, g_0	10^{-5}
Разность температур между теплообменниками конвективной камеры, °С	5 ÷ 65
Диапазон рабочих частот в режиме регистрации квазистатической компоненты микроускорений, Гц	0,01-1,00

НА «Дакон-П» будет установлена на силовой раме ТГК с помощью специальной транспортировочной рамы. Установка НА во время доставки и проведения эксперимента различная, что связано с особенностями конструкции. Поэтому при подготовке к проведению эксперимента будет использован экипаж МКС. Транспортировочная рама с установленной на ней НА «Дакон-П» показана на рис. 2.

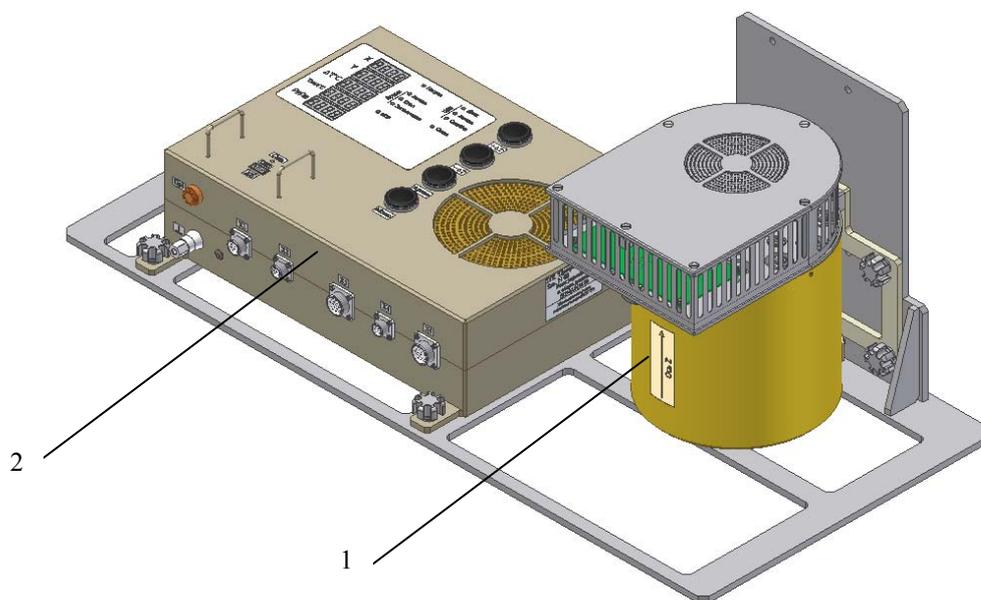


Рис. 2. НА «Дакон-П» на транспортировочной раме на ТГК:
1 – конвективная камера; 2 – блок управления и сбора данных

Принцип работы НА «Дакон-П» основывается на создании температурного градиента между торцами цилиндрической полости и на измерении искажения температурного поля за счёт конвективного движения при наличии перпендикулярной к оси симметрии цилиндра составляющей инерционного или остаточного гравитационного ускорения. С ростом величины массовой силы возрастает и интенсивность конвективного

движения, а следовательно возрастает и искажение температурного поля внутри полости, которое фиксируется батареей дифференциальных термопар. После оцифровки сигнал передаётся в блок управления и сбора данных, записывается на электронный накопитель информации, передаётся в ТМ-систему и бортовую вычислительную систему ТГК «Прогресс».

Конвективная камера и её составные части показаны на рис. 3. Стальной цилиндрический стакан с торца прижат своим фланцем к теплообменнику, который охлаждается за счёт обдува электровентилятором. Для увеличения теплообмена между фланцем рабочей полости и теплообменником холодильника из двенадцати шпилек только шесть являются стальными (марка стали 20), а шесть латунными (с латунными шайбами и гайками). Теплообменник холодильника снабжён радиатором с защитной сеткой с ячейками размером 1×1 мм.

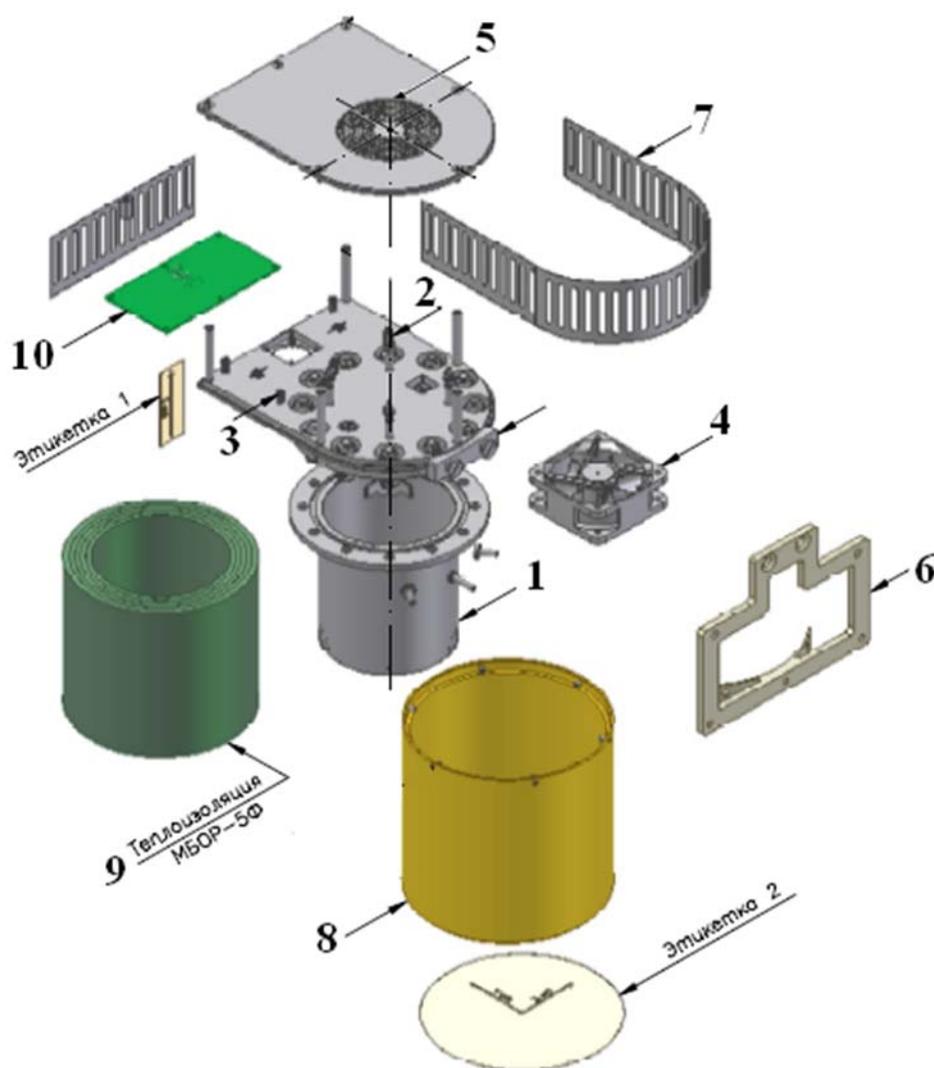


Рис. 3. Составные части конвективной камеры НА «Дакон-П»:

1 – стальной цилиндрический стакан; 2 – стальные шпильки; 3 – дюралюминиевый теплообменник холодильника; 4 – электровентилятор; 5 – защитная сетка (1×1 мм); 6 – крепёжный кронштейн; 7 – обечайка; 8 – капролоновый защитный кожух; 9 – теплоизолятор; 10 – блок измерений конвективной камеры

Принцип работы датчика конвекции

В основе работы датчика конвекции лежит регистрация изменений температуры, возникающих вследствие конвективного движения неоднородно нагретой рабочей среды в замкнутой полости. Регистрация изменений температуры может происходить с помощью сигнальных термопар, а также оптическими методами. Интенсивность конвективного течения определяется безразмерным критерием – числом Релея, которое пропорционально величине микроускорения \mathbf{g} и зависит от геометрических параметров камеры, физических свойств среды и от градиента температуры (для некоторых полостей – от разности температур между горячей и холодной стенками). В газовых средах управлять числом Релея Ra можно также при помощи давления. Для цилиндрической камеры НА «Дакон-П» число Релея связано с давлением газа следующим полуэмпирическим соотношением:

$$Ra = \left(\frac{g_0 \beta}{\nu \chi} \right)_{P_0} h^3 \Delta T \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \frac{g}{g_0},$$

где g_0 – ускорение свободного падения; β, ν, χ – соответственно тепловое расширение, кинематическая вязкость и температуропроводность при давлении P_0 ; h – высота цилиндра; ΔT – перепад температуры между торцами; P – давление газа; P_0 – атмосферное давление 100 кПа; g – ускорение камеры.

Важна также ориентация вектора ускорения \mathbf{g} относительно приложенного градиента температуры $|\mathit{grad} T| = \frac{\Delta T}{h}$. Конвективные датчики «Дакон», «Дакон-М», «Дакон-П» реагируют на проекцию вектора микроускорения на плоскость, параллельную торцам полости (подогрев «сбоку»). Проекция микроускорений на главную ось цилиндра не оказывает существенного влияния на течение до тех пор, пока величина числа Релея не превышает 10^4 .

Для регистрации течения используются две батареи дифференциальных термопар, спаи которых установлены на двух взаимно перпендикулярных диаметральных линиях. При разности температур между спаями термопар T_x и T_y величина $Q = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} / \Delta T$ служит мерой интенсивности конвективного течения. В диапазоне чисел Релея от 0 до $\sim 3 \cdot 10^3$ наблюдается линейная связь между числом Релея и интенсивностью течения $Q = \alpha Ra$, где α – безразмерный коэффициент. Линейная связь подтверждается в лабораторных экспериментах и в численном трёхмерном расчёте конвекции. Безразмерный коэффициент α определяется свойствами конвекции при нагреве сбоку и тепловыми условиями на границах конвективной камеры. Если теплопроводность стенок камеры много больше теплопроводности газа, то численный расчёт даёт предельное значение $\alpha = 10 \cdot 10^{-5}$. Экспериментальные реализации датчика конвекции дают более низкие значения этого коэффициента из-за неизбежных погрешностей при изготовлении камеры и термосенсоров. Поэтому можно считать коэффициент α показателем качества конвективной камеры. Чем ближе α к предельному расчётному значению, тем лучше. Так, например, камера «Дакон», которая работала на ОС «Мир» в 1998 г., показала $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, в линейном диапазоне конвективного датчика показания термопар пропорциональны компонентам микроускорения g_x и g_y вдоль

соответствующих осей камеры: $T_x = \gamma g_x / g_0$ и $T_y = \gamma g_y / g_0$, где γ – коэффициент пропорциональности (чувствительность датчика конвекции). Размерность чувствительности – это градусы температуры, но с учётом того, что принято микроускорения нормировать на g_0 и использовать естественную безразмерную единицу $1 \mu g = 10^{-6} g / g_0$, удобно говорить о чувствительности в единицах $^{\circ}C / \mu g$. Чувствительность следующим образом зависит от параметров камеры, показателя её качества α и свойств газа:

$$\gamma = \alpha \left(\frac{g_0 \beta}{\nu \chi} \right)_{P_0} h^3 \Delta T^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^2.$$

В табл. 2 представлены значения чувствительности НА «Дакон-П» и её прототипов (для сравнения характеристик НА «Дакон-М» и НА «Дакон-П» перепад температур между теплообменниками выбирался одинаковым – $65^{\circ}C$)

Таблица 2. Чувствительность НА «Дакон-П» и её прототипов

$\gamma, ^{\circ}C / \mu g$	$h, \text{см}$	Газ	$P, \text{кПа}$	$\Delta T, ^{\circ}C$	Экземпляр
0.0012	4.55	воздух	100	50	НА «Дакон» (ОС «Мир»)
0.064	10.0	CO ₂	200	65	НА «Дакон-М» РС МКС
0.2 – 0.3	10.0	CO ₂	500	65	НА «Дакон-П»

Таким образом, расчётный порог чувствительности НА «Дакон-П» составляет $10^{-7} g$.

Заключение

Для получения и измерения конвективных потоков в неоднородных по плотности газообразных средах, заключённых в герметичную ячейку, в условиях микрогравитационной обстановки на борту ТГК «Прогресс» планируется применять НА «Дакон-П». В автономном полёте ТГК будут реализованы режимы ориентации, обеспечивающие минимальный или заданный уровни микроускорений. Таким образом, будет исследована зависимость процесса конвекции от уровня микроускорений, возникающих в космическом полёте. Информация от НА «Дакон-П» с помощью телеметрической системы ТГК будет оперативно передаваться на Землю и записываться на съёмный носитель. По окончании эксперимента ТГК «Прогресс» будет повторно состыкован со станцией и НА «Дакон-П» возвращена на станцию для выполнения новых серий экспериментов.

Библиографический список

1. Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Авдеев С.В., Иванов А.И., Максимова М.М. Изучение тепловой конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе «Мир» при помощи датчика «Дакон» // Космические исследования. 2001. Т. 39, № 2. С. 161-169.
2. Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Бабушкин И.А., Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Иванов А.И., Сазонов В.В. Исследование микроускорений на борту международной космической станции с помощью датчика конвекции «Дакон-М» // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 5. С. 373-379.
3. Беляев М.Ю., Карасёв Д.В., Матвеева Т.В., Рулев Д.Н. Грузовые корабли «Прогресс» в программах орбитальных станций (к 40-летию первого в мире полёта грузово-

го корабля к орбитальной станции) // *Космическая техника и технологии*. 2018. № 1 (20). С. 23-39.

4. Matveeva T.V., Belyaev M.Y., Tsvetkov V.V. Challenges and perspectives of transport cargo vehicles utilization for performing research in free flight // *Acta Astronautica*. 2014. V. 94, Iss. 1. P. 139-144. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.08.014

5. Беляев М.Ю., Легостаев В.П., Матвеева Т.В., Монахов М.И., Рулев Д.Н., Сазонов В.В. Отработка методов проведения экспериментов в области микрогравитации в автономном полёте грузового корабля «Прогресс М-20М» // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 3 (6). С. 22-32.

6. Брюханов Н.А., Цветков В.В., Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Матвеева Т.В., Сазонов В.В. Экспериментальное исследование режимов неуправляемого вращательного движения КА «Прогресс» // *Космические исследования*. 2006. Т. 44, № 1. С. 52-61.

7. Беляев М.Ю., Матвеева Т.В. Способ управления ориентацией космического аппарата при проведении экспериментов с научной аппаратурой по изучению конвекции: патент РФ № 2581281; опубл. 20.04.2016; бюл. № 11.

8. Матвеева Т.В., Беляев М.Ю. Способ определения тензора инерции космического аппарата в полёте: патент РФ № 2587764; опубл. 20.06.2016; бюл. № 17.

CONVECTIVE CURRENT EXPERIMENTS USING DAKON-P EQUIPMENT ONBOARD “PROGRESS” CARGO SPACECRAFT

© 2019

- D. M. Ayukaeva** Engineer;
S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolev, Russian Federation;
diana.ayukaeva@rsce.ru
- I. A. Babushkin** Candidate of Science (Phys. & Math.), Head of Department
of General Physics;
Perm State University, Perm, Russian Federation;
info@psu.ru
- M. Yu. Belyaev** Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Head of Research
and Engineering Center, Head of Department;
S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolev, Russian Federation;
mikhail.belyaev@rsce.ru
- Ye. A. Zilberman** Chief of Laboratory;
Perm State University, Perm, Russian Federation;
zilberman_e@mail.ru
- T. V. Matveeva** Deputy Head of Department, Head of Sector;
S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolev, Russian Federation;
tatiana.matveeva@sfoc.ru
- A. S. Sidorov** Chief of Laboratory;
Perm State University, Perm, Russian Federation;
info@psu.ru

In order to conduct experiments to study convection under microgravity it is proposed to use the “Progress” cargo transportation spacecraft. This is due to the fact that the microgravity environment onboard the Russian Segment (RS) of the ISS is not favorable, since the ISS center of mass is in the US segment, while many onboard systems generating micro-accelerations are installed in the ISS RS. There is no crew and no life support systems onboard the cargo spacecraft and micro-accelerations in it are significantly lower than those in the ISS RS. Passive modes of the cargo spacecraft attitude control are particularly favorable for carrying out microgravity experiments in space. In the course of a series of experiments conducted onboard a cargo spacecraft to find the minimal level of residual micro-

accelerations, the gravity orientation mode turned out to be the most suitable one. It is planned to conduct an experiment to study convective isothermal currents using the Dakon-P scientific gear specifically developed for this purpose onboard “Progress” spacecraft in free flight in the gravity orientation mode.

Convection; micro-acceleration; “Progress” cargo transportation spacecraft; control methods.

Citation: Ayukaeva D.M., Babushkin I.A., Belyaev M.Yu., Zilberman Ye.A., Matveeva T.V., Sidorov A.S. Convective current experiments using Dakon-P equipment onboard “Progress” cargo spacecraft. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 7-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-7-17

References

1. Babushkin I.A., Bogatyrev G.P., Glukhov A.F., Putin G.F., Avdeev S.V., Ivanov A.I., Maksimova M.M. Investigation of thermal convection and low-frequency microgravity by the DACON sensor aboard the Mir orbital complex. *Cosmic Research*. 2001. V. 39, Iss. 2. P. 150-158. DOI: 10.1023/A:1017547111930
2. Putin G.F., Glukhov A.F., Babushkin I.A., Zavalishin D.A., Belyaev M.Y., Ivanov A.I., Sazonov V.V. Study of microaccelerations onboard the International Space Station with the DAKON-M convection sensor. *Cosmic Research*. 2012. V. 50, Iss. 5. P. 346-352. DOI: 10.1134/S001095251205005X
3. Belyaev M.Yu., Karasev D.V., Matveeva T.V., Rulev D.N. Progress cargo vehicles in orbital-station programs (dedicated to the 40th anniversary of the world’s first cargo vehicle space flight to an orbital station). *Space Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (20). P. 23-39. (In Russ.)
4. Matveeva T.V., Belyaev M.Y., Tsvetkov V.V. Challenges and perspectives of transport cargo vehicles utilization for performing research in free flight. *Acta Astronautica*. 2014. V. 94, Iss. 1. P. 139-144. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.08.014
5. Belyaev M.Yu., Legostaev V.P., Matveeva T.V., Monakhov M.I., Rulev D.N., Sazonov V.V. Development of methods of conducting microgravity experiments in free flight of progress M-20M logistics vehicle. *Space Engineering and Technology*. 2014. No. 3 (6). P. 22-32. (In Russ.)
6. Bryukhanov N.A., Tsvetkov V.V., Belyaev M.Yu., Babkin E.V., Matveeva T.V., Sazonov V.V. Experimental investigation of the modes of operation of uncontrolled attitude motion of the progress spacecraft. *Cosmic Research*. 2006. V. 44, Iss. 1. P. 48-57. DOI: 10.1134/S0010952506010059
7. Belyaev M.Yu., Matveeva T.V. *Sposob upravleniya orientatsiy kosmicheskogo apparata pri provedenii eksperimentov s nauchnoy apparaturoy po izucheniyu konveksii* [Method for controlling spacecraft attitude during experiments with scientific gear to study convection]. Patent RF, no. 2581281, 2016. (Publ. 20.04.2016, bull. no. 11)
8. Matveeva T.V., Belyaev M.Yu. *Sposob opredeleniya tenzora inertsii kosmicheskogo apparata v polete* [Method for determining inertia tensor of spacecraft in flight]. Patent RF, no. 2587764, 2016. (Publ. 20.06.2016, bull. no. 17)