

УДК 531/534; 629.783:523.3

ПРОБЛЕМА МИКРОУСКОРЕНИЙ: 30 ЛЕТ ПОИСКА РЕШЕНИЯ

Седельников А.В.

*Институт энергетики и транспорта**Самарского государственного аэрокосмического университета, Самара*

В статье изложена история возникновения проблемы микроускорений, намечены основные этапы развития проблемы, рассмотрено современное состояние и перспективы ее решения.

Рассмотрена история возникновения, основные этапы развития и современное состояние важнейшей на сегодня в космическом материаловедении проблемы микроускорений.

Эра космонавтики дала возможность современным технологиям оторваться от поверхности Земли и осваивать околоземное пространство. Полеты человека в космос и испытываемое там ощущение полной невесомости вселили надежду в умы технологов, которые всю историю развития технологий боролись с притяжением Земли для решения целого ряда своих задач. То, что невозможно сделать в условиях земного притяжения, - в невесомости космического пространства вполне реально. Поэтому 12 апреля 1961 года можно смело считать датой идейного рождения новой науки – космическое материаловедение [4, 45, 49, 50, 51].

Начались полномасштабные исследования новой благоприятной ситуации отсутствия тяготения, в результате которых появились первые сверхчистые материалы – полупроводниковый германий с процентным содержанием вещества 99,9999% и выше [37, 48, 59]. Возможность подавления движений конвективного типа для разделения веществ использовала и медицина, - был разработан целый ряд медицинских препаратов, которые по составу строго отвечали заданным требованиям. Никаких существенных проблем на пути космических технологий не возникало до 1975 года, и казалось, что космическое материаловедение полностью перевернет сложившиеся стереотипы и станет настоящей революцией в области технологий [58, 62].

В 1975 году усилиями американских и канадских специалистов в условиях строжайшей секретности была создана космическая лаборатория для получения сверхтонких оболочек из монокристаллов. Предполагаемая прочность выращенной в космосе оболочки должна была, по оценкам экспертов, на два порядка превзойти аналогичную поликристаллическую. Простой анализ показывает, что разрушение материалов происходит из-за слабости межкристаллических связей. Отсюда возникает не менее простое и

самое радикальное решение – вообще избавиться от этих связей. А это, в свою очередь, позволит существенно сократить расход материала на практически любое производство. Следует также отметить, что не случайно этой проблемой раньше всех занялись именно американцы – достаточно скудные природные ресурсы самой страны подталкивали к другому, нетрадиционному решению проблемы производства [52]. Однако и японские ученые тоже не остались в стороне, о чем свидетельствуют конгрессы и международные семинары, проводимые в Японии [63].

Результаты испытаний абсолютно не подтвердили возлагаемые надежды: реальная прибавка прочности оказалась намного скромнее - 12 раз против предполагаемых ста [60, 61]. Впервые вместо радости успеху в открытии новых возможностей наступило разочарование. Не раскрывая до поры до времени своих тайн, ученые США и Канады бились над загадкой произошедшего. Однако решить проблему в одиночку и выявить причину неудач им не удалось.

После появления первых публикаций о неудачном эксперименте [31, 36, 42, 46, 47], усилиями всех ученых мира было выяснено, что преградой на пути революционно новых технологий стали микроускорения [5, 28, 33, 34, 40, 41]. Их поле образуется внутри космического аппарата (КА) от различного рода внешних (притяжение Земли, аэродинамическое сопротивление и др.) и внутренних (работа управляющих ракетных двигателей (УРД) системы ориентации КА, другого оборудования КА и др.) воздействий [1, 4, 8, 38, 39, 43, 44]. Изучение, прогнозирование и обеспечение необходимого для технологического процесса уровня микроускорений стало одной из важнейших проблем космического материаловедения и объединило усилия ученых всех космических держав мира.

Появление поля микроускорений, как оказалось в последствии, было заложено как в конструктивно-компоновочной схеме (ККС) самого КА и способе управления им, так и в реализации технологических процессов на его борту [8].

Следующим шагом в решении неожиданно возникшей проблемы стало детальное исследование микроускорений непосредственно в космосе с целью выявления способов борьбы с ними. В России экспериментальная отработка программы по исследованию микроускорений началась с орбитальных комплексов «Салют-6» и «Салют-7» [7, 23, 24]. Разрабатывались методики и приборы для измерения микроускорений. Так, например, в Пермском государственном университете был разработан и изготовлен датчик конвекции «Дракон», а также создана методика определения микроускорений с помощью этого датчика, которая основана на том, что интенсивность движений конвективного типа зависит от уровня микроускорений [18]. В течение двух лет этот датчик испытывался на борту орбитальной станции МИР и использовался для определения микроускорений [5]. На орбитальной станции МИР проводилась и совместная российско-американская программа «МИР-НАСА» с использованием американских систем измерения и регистрации микроускорений MASU и SAMS для обработки полученных результатов ракетно-космической корпорацией «Энергия» (г. Королев) был разработан специальный программный пакет обработки сигналов [26, 19].

Далее проведен целый ряд экспериментов на ИСЗ от ФОТОН 2 (1986 г.) до ФОТОН 10 (1995 г.), а также ФОТОН 11 (1997 г.) и ФОТОН 12 (1999 г.). Причем на этих КА применялась как отечественная измерительная аппаратура СИУ01, СИУ02 и СИУ03, разработанная вместе с комплексом технологических установок У301, У304, ПОЛИЗОН конструкторским бюро общего машиностроения им. В.П. Бармина (г. Москва) (ФОТОН 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) [2], так и зарубежная – французские акселерометры ВЕТА [22], установленные на борту ФОТОН 11, а также разработанная специалистами германского центра DLR аппаратура QSAM [35]. С помощью многопозиционной установки ПОЛИЗОН проводились эксперименты и в земных условиях – в диапазоне частот 1...500 Гц измерения вибрационной составляющей выполнялись системой СИУ02, – квазистатической составляющей (0,02...50 Гц) – модифицированной системой СИУ03 [3].

После создания международной космической станции «Альфа» (МКС) интерес к исследованию микроускорений возрос еще больше, т.к. именно на ее борту в ближайшие десятилетия планируется широкомасштабное проведение различных технологических экспериментов. Поэтому не случайно в научно-исследовательскую программу совместного российско - американского полета STS106, который стартовал

8.09.2000 г. с космодрома космического центра им. Кеннеди (мыс Канаверал, США), входили пять экспериментов, четыре из которых были так или иначе связаны с проблемой микроускорений.

За рубежом также проводились многочисленные эксперименты по исследованию уровня микроускорений. Особенно следует подчеркнуть программы на борту орбитальной космической станции (ОКС) «Freedom». Тщательно было изучено, как влияет на уровень микроускорений жизнедеятельность экипажа, программные развороты и маневры ОКС, разворачивание панелей солнечных батарей (ПСБ), различные режимы управления движением станции [32, 56].

Серьезность этой проблемы привела к созданию в разных странах специализированных научных подразделений, которые занимается исключительно проблемой микроускорений. В США это National Center for Microgravity Research, в Бельгии – Microgravity Research Centre (MRC), в Германии – Microgravity laboratory «Drop Tower Bremen» (ZARM), в Японии – Japan Microgravity Center (JAMIC) и др.

За истекшие тридцать лет активных попыток решения проблемы выявились и некоторые ее особенности. Во-первых, сформулированы четкие требования к критическому уровню микроускорений, который гарантировал бы успешное завершение технологических процессов [29]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\mathbf{r}}{w} \right| \leq 10^{-6} g \text{ для частот } f_u < 0,1 \text{ Гц}; \\ \left| \frac{\mathbf{r}}{w} \right| \leq 10^{-5} \cdot f_u \cdot g \text{ для частот } 0,1 \leq f_u \leq 100 \text{ Гц}; \\ \left| \frac{\mathbf{r}}{w} \right| \leq 10^{-3} g \text{ для частот } f_u > 100 \text{ Гц}; \end{array} \right. (1)$$

Во-вторых, структурированы и сами микроускорения: теперь они подразделяются на низкочастотные (квазистатическая компонента) и высокочастотные. Причем, выявлено пагубное влияние именно квазистатической составляющей микроускорений. Это, в свою очередь, переключило взоры исследователей именно в ее сторону [20].

Параллельно экспериментам по измерению микроускорений шли и технологические эксперименты, которые раскрыли ряд довольно необычных процессов. Так, например, подводя итоги целым сериям экспериментов на борту «Салют-6» (1978 г.), «Космос-1645» (1985 г.), «Космос-1744» (1986 г.), ФОТОН 5 (1989 г.), где была установлена аппаратура «Сплав01» и «Сплав02» по выращиванию кристаллов InSb:Te [10, 30, 64], а также ФОТОН 3 с аппаратурой «Зона-4» [9, 11, 27], было выяснено, что необычно ведет себя примесный канал: почти синусоидальные колебания [12]. Захват примеси целиком и полностью связан с движениями конвективного типа. Таким образом, не только величина квазистатической компоненты, но и изменение ее

компоненты, нормальной направлению кристаллизации, а также параметры самого технологического процесса (разность температур и концентраций, характерные размеры области расплава) и даже физические параметры материала влияют на структуру выращиваемых кристаллов. Поэтому коллектив авторов во главе с заведующим лабораторией полупроводниковых материалов ИМЕТ, д.т.н., проф. Земсковым В.С. вместо казавшихся универсальными требований (1) на основе детального изучения выращенных кристаллов на различных КА, начиная с 1975 г., предлагает иные условия достижения однородности кристаллов: предельное снижение интенсивности конвекции, например, по числу Рэлея:

$$Ra < 0,01 \quad (2)$$

При этом, по-прежнему, считается, что существенную роль играет квазистационарная компонента микроускорений, - вклад вибрационной составляющей в образование неоднородностей при кристаллизации еще до конца не прояснен, но, по мнению авторов, вряд ли существенен [13, 14, 15, 65]. Таким образом, простое ограничение амплитудных значений квазистатической компоненты едва ли позволит решить революционные задачи космических технологий будущего. Оказывается, что проблема микроускорений намного шире и многограннее, чем предполагалось ранее. Не случайно в 2001 году авторитетнейший аэрокосмический журнал «Космические исследования» делает первую специализированную подборку работ по проблеме микроускорений под общим заголовком «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы».

Еще одной немаловажной особенностью всех экспериментальных определений является то, что микроускорения в чистом виде измерить как температуру или давление нельзя. Для обработки измерений различного рода датчиков, которые используют в своей основе совершенно разные принципы (от интенсивности конвективных движений «Дракон» до записи виброграмм SAMS и MASU), строятся, по сути, математические модели изучаемых процессов. Поэтому эти данные, на мой взгляд, не могут считаться данными чистого классического эксперимента, т.е. незабываемым эталоном для проверки математических моделей, связанных с оценкой микроускорений [25].

В подтверждение сказанному выше можно привести отчет о обработке результатов обработки замеров уровня микроускорений на борту ИСЗ ФОТОН 11 с помощью французских акселерометров ВЕТА [22]. Авторы работы указывают на возможно неправильное использование программного обеспечения, т.к. в приведенных

графических зависимостях различных компонент микроускорения от времени имеется большое постоянное смещение. Хочется отметить также, что, согласно этим измерениям, первая компонента имеет максимальное значение порядка $1,6 \times 10^{-4} \text{ м/с}^2$, вторая – $5,7 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$, а третья – $3,1 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Хотя никаких причин для такого отличия в значениях (более, чем в 20 раз), кроме отката аппаратуры, на мой взгляд, нет.

Те же трудности испытывали и зарубежные специалисты, проводившие серии экспериментов «Columbus» на борту ОКС «Freedom» в рамках общеевропейской программы Space Shuttle [29, 53, 54, 55, 57]. Их целью были испытания специально разработанного виброизолирующего устройства МГИМ (Microgravity Isolation Mount). Специалисты разделили все эксперименты на удачные и неудачные, не объясняя причину происходящего. Причем, амплитуда микроускорений при неудачных экспериментах была примерно в 20 раз больше, чем при удачных.

Все эти проблемы можно объяснить следующим образом: аппаратура, предназначенная для регистрации микроускорений, является очень высокочувствительной, например, трехосные датчики американской системы SAMS номинально регистрируют микроускорения от 10^{-6} г до 0,5 г. Это диктуется, прежде всего, требованиями к самим микроускорениям (1). При старте ракеты-носителя полезная нагрузка, и в том числе измерительная аппаратура, испытывают значительные перегрузки. Поэтому логично проверить перед регистрацией микроускорений работоспособность самой аппаратуры. Наверняка, многие неудачи объясняются именно этим.

За все годы существования проблемы микроускорений борьба с ними велась нешуточная. Экспериментаторы боролись по-своему, пытаясь усовершенствовать ККС КА и размещение технологического оборудования внутри КА. Многочисленные эксперименты показали, что, как правило, технологические процессы достаточно энергоемкие. Это приводит к тому, что для их энергопитания необходимы достаточно протяженные ПСБ и жесткая ориентация КА в пространстве, чтобы они были ориентированы на Солнце и стабильно обеспечивали технологическое оборудование электроэнергией. Однако активная ориентация КА с помощью УРД совершенно недопустима во время проведения технологического процесса, т.к. уровень создаваемых микроускорений намного превышает условия микрогравитационного штиля (1) и составляет примерно 10^{-2} г для квазистатической составляющей [6]. Из этой ситуации нашелся следующий выход: эксперименты проводить между включениями УРД, используя пассивную ориен-

тацию КА, например, с помощью гиродинов. При своем вращении маховики гиродинов создают вибрационную составляющую, которая значительно менее опасна, чем квазистатическая.

Однако возникла другая проблема. Включаясь, двигатели УРД возбуждают колебания ПСБ, которые долго не затухают и после выключения системы активной ориентации. Учитывая размеры самих ПСБ (3 м и даже 5 м), уровень создаваемых микроускорений, которые передаются посредством достаточно жесткого узла крепления (эта жесткость также объясняется необходимостью четкой ориентации ПСБ), как правило, нарушает требования (1).

Была сделана попытка отказаться от ПСБ, выводя модуль с технологическим оборудованием в открытый космос и снабжая его автономными энергоисточниками. Уже в самом подходе просматриваются ограничения, связанные с энергоресурсами. Возникают также и дополнительные трудности по возвращению этого модуля на КА. Тем более ни о каком серийном производстве речи идти не может, т.к. необходимо периодически возвращать модуль на КА и заряжать его источники энергии.

В качестве следующего варианта рассматривалось выведение модуля с оборудованием без собственных энергоисточников. Осуществлять энергопитание предполагалось с помощью электрокабеля от КА. С одной стороны, такой модуль проще вернуть на КА, т.к., по сути, он к нему привязан, а также нет необходимости в подзарядке. Но, с другой стороны, кабель – это механическая связь модуля с корпусом КА. Эксперименты показали, что он может запутаться, если будет достаточно длинным. При коротком кабеле существует значительная вероятность столкновения модуля с КА или его выступающими элементами, например, теми же ПСБ.

Таким образом, идея выведения технологического оборудования за пределы КА пока не находит достойной реализации. И опять вернулись к проблеме обеспечения микрогравитационного штиля внутри КА. Здесь следует отметить, что не все задачи равнозначны. Ярким примером успешной борьбы с квазистатической компонентой стал французский КА «Спот-4». ККС аппарата включала в себя одну ПСБ, которая крепилась к корпусу КА посредством упругой штанги [16].

Благодаря такому конструктивному решению удалось уменьшить квазистатическую компоненту микроускорений до пренебрежимо малых значений. Оценки показывают, что при жестком креплении ПСБ в корпус КА уровень квазистатической компоненты составлял бы при-

мерно $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ g м/с}^2$, при креплении с помощью штанги – примерно $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ g м/с}^2$.

Однако следует заметить, что «Спот-4» – это космический телескоп, который предназначен для наблюдения за наземными и космическими объектами. При этом для работы телескопа больших энергозатрат не требовалось, поэтому разработчики обошлись всего одной ПСБ, которая к тому же была лишена жесткой ориентации из-за применения гибкой штанги. С поставленной задачей КА успешно справился, наглядно продемонстрировав всему миру, как можно эффективно бороться с квазистатической компонентой микроускорений при неэнергоёмком процессе.

Но, по-прежнему, в общей постановке проблема не решена. В настоящее время ряд исследователей продолжает развивать идею изоляции технологического оборудования от корпуса КА. И это развитие уже проходит на качественно новом уровне: если нельзя (или достаточно сложно) обеспечить условия микрогравитационного штиля во всем КА, а применять активные демпферы для каждого конструктивного элемента, который порождает микроускорения, нецелесообразно как в виду сложности расчетов характеристик демпферов (для исключения резонансов), так и в виду элементарного утяжеления всей конструкции КА, то почему бы не попытаться создать «защищенную» от микроускорений площадку.

Такая площадка, которая называлась пассивная виброзащитная платформа ВЗП-1К, была впервые разработана НПО «Композит» и испытана на ОКС «Мир» [17, 21]. Оценка микроускорений проводилась с помощью комплекта французской аппаратуры «Микроакселерометр» с порогом чувствительности $0,001 \text{ м/с}^2$ и интервалом дискретизации по времени – $0,001 \text{ с}$. Исследования показали, что в диапазоне частот свыше 3 Гц платформа снижает вибрационную компоненту микроускорений более, чем в 10 раз, причем, некоторые гармоники с большой амплитудой гасятся более, чем в 50 раз, а некоторые гармоники с малой амплитудой – в 10 раз.

К сожалению, осталось неясным, может ли защитить эта платформа от квазистатической компоненты. Чувствительность акселерометров не позволяет сделать выводы об эффективности ВЗП-1К при обеспечении условий (1). Однако это был, наряду с виброизолирующим устройством MGIM (ОКС «Freedom») один из первых шагов по пути создания подобных платформ.

Идея обеспечения нужного уровня микроускорений не во всем внутреннем пространстве КА, а лишь в рабочей зоне технологического оборудования в настоящее время считается одной из самых перспективных. В 15 мая 1998 г. на

МКС «Альфа» были установлены датчики микроускорений ВМ-0,9 на виброизолирующей платформе ВЗП-1Л технологической установки «Кратер». На этом оборудовании, расположенном в российском сегменте МКС, предполагается выращивание кристаллов.

Созданием микрогравитационной космической платформы (МКП) «Фотон-М», которая должна выдержать пятнадцатисуточный неориентированный полет, занимается ряд специалистов Центрального специализированного конструкторского бюро (ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс»). Для оценки уровня микроускорений создана специальная аппаратура «Мираж-М» и «Чистота». Первые испытания МКП планировались на КА «Фотон-М №1», однако, запуск аппарата, который состоялся 15 октября 2002 г., оказался неудачным.

Большое количество просчетов и ошибок при экспериментальной обработке наглядно продемонстрировали, что дорогостоящие натурные испытания далеко не всегда оправдывают затраты, поэтому, на мой взгляд, более важную роль в современных условиях играет моделирование микроускорений [1]. Эксперименты, в свою очередь, могут служить подтверждением или опровержением теоретических гипотез и положений на данном этапе развития данного научного направления.

Проблему микроускорений уже нельзя считать новой и молодой: накоплен колоссальный опыт как моделирования микроускорений, так и экспериментальной обработки, однако, не смотря на значительные усилия ученых всего мира, общего решения этой важнейшей задачи, которое позволило бы совершить настоящий переворот в современном производстве, до сих пор нет.

С ПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авраменко А.А., Седельников А.В. Моделирование поля остаточной микрогравитации на борту орбитального КА Изв. вузов Авиационная техника. - 1996. - N 4. - с. 22-25.

2. Бармин И.В., Волков М.В., Егоров А.В., Реут Э.Ф., Сенченков А.С. Результаты измерения ускорений технологических установок на борту космических аппаратов ФОТОН Космические исследования. - том 39. - № 4. - 2001. - с. 407 - 418.

3. Бармин И.В., Сенченков А.С. Технологическое оборудование автоматического спутника «Фотон» и некоторые результаты экспериментов Известия АН. – Механика жидкости и газа. - № 4. – 1994. – с. 37 – 45.

4. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс М.: Наука. – 1965. – 416 с.

5. Беннет В.Г., Кватни Г.Г. Континуальное моделирование гибких конструкций применительно к управлению колебаниями Аэрокосмическая техника. - 1990. - N 7. - с. 21 – 32.

6. Березин И.А., Сазонов В.В., Стажков В.И. Расчет микроускорений на орбитальном комплексе «Мир» Труды XXV Чтений К.Э. Циолковского. - М. - 1991. - с. 22 - 31.

7. Гришин С.Д., Дубовский В.Б., Лесков Л.В., Обыденников С.С. и др. Измерение малых ускорений на орбитальной научной станции «Салют-6» Космические исследования. - 1980. - т. XX. - N 3. - с. 479 – 483.

8. Докучаев Л.В. Нелинейная динамика летательных аппаратов с деформируемыми элементами М. - Машиностроение. - 1987. - 232 с.

9. Земсков В.С., Раухман М.Р. Влияние невесомости и магнитного поля на ликвационные процессы в кристаллах антимонида индия Физика и химия обработки материалов. - №4. – 1987. – с. 63-67.

10. Земсков В.С., Раухман М.Р., Козицына Е.А., Арсентьев И.М. Эксперименты по направленной кристаллизации в ампулах антимонида индия на искусственных спутниках «Космос1744» и «Фотон» Физика и химия обработки материалов.- №5.– 1991. – с. 46-52.

11. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Гравитационная чувствительность расплавов при выращивании кристаллов InSb:Te методами Бриджмена и бестигельной зонной плавки в условиях микрогравитации Космические исследования. – том. 39. - №4. – 2001. – с. 375 – 383.

12. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Влияние условий микрогравитации на однородность кристаллов полупроводников, выращиваемых на космических аппаратах методами направленной кристаллизации Итоги и перспективы исследований в ИМЕТ РАН. – I Российская конференция по космическому материаловедению (г. Калуга, 10-12 ноября 1999 г.). – Поверхность. – 2001.

13. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Новые знания о процессах, сопровождающих направленную кристаллизацию расплавов Сборник трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем» (г. Москва, 11-14 апреля 2000 г.). – 2001. – с. 34-51.

14. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Неоднородность распределения компонентов в поперечных сечениях кристаллов, выращенных методом Бриджмена в космическом полете как результат гравитационной чувствительности расплава (обзор работ ИМЕТ РАН) Сборник трудов VII Российского симпозиума

«Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем» (г. Москва, 11-14 апреля 2000 г.). – 2001. – с. 425-443.

15. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Гравитационная чувствительность расплавов InSb-Te и растворов-расплавов InSb-InBi при направленной кристаллизации в условиях невесомости (обзор работ ИМЕТ РАН) Сборник трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно - чувствительных систем» (г. Москва, 11-14 апреля 2000 г.). – 2001. – с. 527-543.

16. Киселев А.И., Медведев А.А., Меньшиков В.А. Космонавтика на рубеже тысячелетий: итоги и перспективы. – М.: Машиностроение. – 2001. – 672 с.

17. Левтов В.Л., Романов В.В., Иванов А.И., Рябуха С.Б., Сазонов В.В. Результаты летно-космических испытаний виброзащитной платформы ВЗП-1К Космические исследования. – том. 39. - №2. – 2001. – с.148-160.

18. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции Космические исследования. - том 39. - № 2. - 2001. - с. 179-187.

19. Рябуха С.Б., Киселев С.В. Некоторые особенности вибрационных возмущений на борту орбитального комплекса МИР Космические исследования. - том 39. - № 2. - 2001. - с. 129 - 135.

20. Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Стажков В.М., Бабкин Е.В. Определение квазистатической составляющей микроускорения на станции МИР Космические исследования. - том 39. - № 2. - 2001. - с. 136-147.

21. Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И. и др. Микроускорения на орбитальной станции «Мир»: оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса Космические исследования. – том. 37. - №1. – 1999. – с.86-96.

22. Сазонов В.В., Чебуков С.Ю., Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Зайцев А.С. Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ ФОТОН-11 Космические исследования. - том 39. - № 4. - 2001. - с. 419 - 435.

23. Сарычев В.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В., Тянь Т.Н. Определение движения орбитальных комплексов «Салют - 6» и «Салют - 7» относительно центра масс в режиме гравитационной ориентации по данным измерений Препринт N 88. -1983. - ИПМ АН СССР. - с. 1 – 8.

24. Сарычев В.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В., Тянь Т.Н. Определение микроускорений на

орбитальных комплексах «Салют – 6» и «Салют – 7» Космические исследования. - 1986. - т. XXIV. - N 3. - с. 337 – 344.

25. Седельников А.В., Бязина А.В., Иванова С.А. Статистические исследования микроускорений при наличии слабого демпфирования колебаний упругих элементов КА Научные чтения в Самарском филиале РАО. – Часть 1. Естественное знание. – М.: Изд. УРАО. – 2003. – 137 – 158.

26. Симаков С.В., Кундик И.А. Оценка влияния основных источников возмущений на микрогравитационную обстановку в модулях ОС МИР по данным аппаратуры SAMS и MASU Космические исследования. - том 39. - № 2. - 2001. - с. 116 - 128.

27. Шульпина И.Л., Сорокин Л.М., Раухман М.Р. и др. Структурное совершенство кристаллов антимонида индия с ростовым p-n переходом, полученных в условиях орбитального полета Физика твердого тела. – Т. 23. - №10. – 1981. – с. 3043 – 3049.

28. Anderson M.S. Vibration of prestressed periodic lattice structures AIAA. - 1982. - vol. 20. - N 4. - pp. 551 – 555.

29. Basso S.D., Lindenmoyer A.J. An assessment of the structural dynamic effects on the microgravity environment of a reference space station 30th Struct., Struct, dyn. and mater. Conf. - 1989. - pp. 1576-1590.

30. Barmin I.V., Zemskov V.S., Raikhman M.R. et al. Growing dopes InSb crystal during the Salut-6 – Soyuz mission Preprint XXXI IAF Congress (Tokyo, Japan, September 21-28, 1980). – IAF-80-C-103. – Pergamon Press. – 1980.

31. Cherchas D.B., Hughes P.C Attitude stability of a dual-spin satellite with a large flexible solar array J. of Spacecraft and Rockets. - 1973. - vol. 10. - N2.- pp. 126 – 132.

32. DeLombard R., Finley B.D., Baugher C.R. Development of and flight results from the space acceleration measurement system AIAA. - 1992.- N 0354. - pp. 1-10.

33. Feuerbacher B., Hamacher H., Jilg R. Analysis of microgravity measurements on D1 38th International astronautic Congress. - 1987. - pp. 1 – 8.

34. Hamacher H., Jilg R., Merbold U. Analysis of microgravity measurement performed during D1 6th European Symposium on material sciences under microgravity conditions. - 1986. - pp. 413-419.

35. Hamacher H., Richter H.-E., Dress S. et al. Microgravity characterisation of the FOTON-11 mission 50th International Astronautical Congress. Amsterdam. – 1999.

36. Hughes P.C. Dynamics of flexible satellites with active attitude control Presented at the XXIIIrd

Congress of the International Astronautical Federation. - Viena. - 1972.

37. Hughes P.C. Flexibility consideration for the pitch attitude control of the communications technology satellite Transactions of the Canadian aeronautics and space institute. - 1972. - vol. 5. - N 1. - pp. 1-4.

38. Ibrahim A.M., Modi V.J. A formulation for studying dynamics of connected flexible deployable members IAF [Pap.]. - 1986. - N 240. - pp. 1-10.

39. Junk D. Mikroba: aus Raumfahrt- und Umwelttechnik Bremen.- 1991. - Dajest.- 5 pp.

40. Kane T.K., Levinson D.A. Formulation of equations of motion for complex spacecraft AIAA. - 1980. - vol. 3. - N 2. - pp. 99-112.

41. Kumar V.K., Bianum P.M. Dynamics of a flexible body in orbit J. Guidance and Control. - 1980. - vol. 3. - N 1. - pp. 90 – 93.

42. Lauerson R.M. Modal analysis of rotating flexible structures AIAA. - 1976. - vol. 14. - N 10. - pp. 1444-1450.

43. Likins P.W. Quasicoordinate equations for flexible spacecraft AIAA.- 1975.- vol. 13. - N 4. - pp. 524-526.

44. Likins P.W., Barbera F.J., Baddeley V. Mathematical modeling of spinning elastic bodies for modal analysis AIAA. - 1981. - vol. 11. - N 9. - pp. 1251-1258.

45. Meirovitch L. Attitude stability of an elastic body of revolution in space J. of the Astronautical Sciences. - 1961. - vol. 8. - N 4. - pp. 110 - 113.

46. Meirovitch L. A stationarity principle for the eigenvalue problem for rotating structures AIAA. - 1976. - vol. 14. - N 10. - pp. 1387-1394.

47. Meirovitch L., Juang J.N. On the natural modes of oscillation of rotating flexible structures about nontrivial equilibrium J. Spacecraft and Rockets. - 1976. - vol. 13. - pp. 37-44.

48. Mitchell T.P., Liu H.S. The influence of material elasticity on satellite motions //Proceeding of the XVIth Congress of the International Astronautical Federation, Gordon and Breach. - New York. - 1966. - pp. 343 – 347.

49. Modi V.J., Brereton R.C. Planar librational stability of a flexible satellite AIAA. - 1968. - vol. 6. - N 3. - pp. 511 – 517.

50. Newton J.K., Farrell J.L. Natural frequencies of a flexible gravity-gradient satellite J. Spacecraft and Rockets. -1968. - vol. 5. - N 5. - pp. 550 – 569.

51. Nelson H.D., Meirovitch L. Stability of a nonsymmetrical satellite with elastically connected moving parts J. of the Astronautical Sciences.- 1966.- vol. 13. -N 6. -pp. 226-234.

52. Overfelt T., Taylor K., Barker J. Space processing Aerospace American. - 1991.-vol. 29. - N12. - p. 49.

53. Owen R.G., Jones D.I Columbus applications study Report BTN 001. - University of Wales. - Bangor. - 1988.

54. Owen R.G., Jones D.L, Owens A.R. Mechanical design and simulation of a microgravity isolation mount for Columbus AIAA. - 1990. - N 3628. - 8 pp.

55. Owen R.G., Jones D.L, Owens A.R. Integration of a microgravity isolation mount within a Columbus single rack Acta Astronautica. - 1990. - vol. 22. – pp. 127-135.

56. Peresty R., Sehnal L. In-orbit microaccelerometric experiment 43rd Congress of the International Astronautical Federation. - 1992. - pp. 1 – 5.

57. Pinson L.D. Recent advances in structural dynamics of large space structures Acta Astronautica. - 1989. - vol. 19. -N2. - pp. 161-170.

58. Santiny P. Stability of flexible spacecraft Acta Astronautica. - 1976. - vol. 3. - N9.- pp. 685-694.

59. Schielen W. Zustandsgleichungen elastischer Satelliten Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Physik. - 1972. - vol. 23. - N 4. - pp. 575 – 586.

60. Vigneron F.R. Effect of the Earth's gravitational forces on the flexible crossed-dipole satellite configuration; part 1 - configuration stability and despin Transactions of the Canadian Aeronautics and Space Institute. - 1970. - vol. 3. – N 2.-pp. 115-126.

61. Vigneron F.R. Effect of the Earth's gravitational forces on the flexible crossed-dipole satellite configuration; part 2 - attitude stability Transactions of the Canadian Aeronautics and Space Institute. - 1970. - vol. 3. - N 2. - pp. 127 – 134.

62. Whisnant J.M., Pisacane V.L. Comparison of theoretical and experimental attitude data for the DODGE spacecraft TG-1076. - 1969. - Applied Physics Lab., Silver Spring, Md.; also presented at the XXth Congress of the International Astronautical Federation, Mar del Plata. - Argentina. – 1970.

63. Yu Y.Y. Some problems in aeroelasticity-dynamics and control of flexible vehicles and spacecraft Proceeding of the VIIth International symposium on space technology and science. - Tokyo. - 1969. - pp. 349 – 358.

64. Zemskov V.S., Raukhman M.R., Belokurova I.N. Experiments on crystallization of semiconductors aboard «Salut-6» - «Soyuz» orbital complex Proceedings 4th Europ. Symp. on Materials Science under Microgravity (Madrid, Spain, April 5-8, 1983). – Paris: ESA SP-191. – 1983. – pp. 325-329.

65. Zemskov V.S., Raukhman M.R. et al. Structural evidence for inhomogeneity of (Ge, Si) < In, Ga, Sb > crystals grown under microgravity Proceedings of the Fourth International Conference «Single Crystal Growth and Heat & Mass Transfer». – ICSC-2001 (Obninsk, Russia, September 24-28 2001). – Vol. 1. – 2001. – pp. 21-31.

THE PROBLEM OF MICROACCELERATION: 30 YEARS OF THE SEARCH SOLUTION

Sedelnikov A.V.

In the article presented history of emergence the problem of microacceleration. The basis steps of development, up-to-date state and prospects of the solution this important problem were shown.